



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

MULTIPARAMETRICKÁ DIAGNOSTIKA GENERÁTORU

MULTIPARAMETRIC GENERATOR DIAGNOSTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Blanka Buchtová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka: **Bc. Blanka Buchtová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Multiparametrická diagnostika generátoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jaderná elektrárna Dukovany je v ČR jedním z výrobců elektrické energie. K důležitým částem elektrárny patří generátor, který právě tuto elektrickou energii vyrábí. Vzhledem k tomu, že je nutný spolehlivý provoz tohoto zařízení, je důležitá k posouzení stavu generátoru technická diagnostika. Z technických diagnostik je v tomto případě využívána multiparametrická diagnostika, a to především diagnostika hluková, vibrodiagnostika a elektrodiagnostika. Diplomová práce je zaměřena právě na tyto uvedené metody a jejich vyhodnocení s důrazem na vlastní závěry.

Cíle diplomové práce:

Rozeberte současný stav řešené problematiky se zaměřením na hlukovou diagnostiku, vibrodiagnostiku a elektrodiagnostiku.

Proveďte systémový rozbor řešené problematiky a navrhnete i zdůvodněte zvolený způsob řešení zadaného úkolu se zaměřením na konkrétní vybraný generátor v ČEZ, a.s., Jaderná elektrárna Dukovany.

Naplánujte experiment dle reality a rozeberte jeho výsledky.

Výsledky experimentu vyhodnoťte.

V diplomové práci formulujte vlastní závěry.

Seznam doporučené literatury:

KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. Technická diagnostika. Senzory-metody-analýza signálu. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, 2006, 408 s. ISBN 80-7300-158-6.

HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost, II. Vibrodiagnostika. 1. vydání-dotisk. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.

HAMMER, Miloš. Metody umělé inteligence v diagnostice elektrických strojů. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2009. 400 s. ISBN 978-80-7300-231-2.

KOPEC, Bernard a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. CERM Brno, 2008. 600 s. ISBN 978-80-7204-591-4.

NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995, 205 s. ISBN 80–01-01306-5.

BERAN, Vlastimil. Chvění a hluk. 1. Vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Vydavatelství, 2010. 204 s. ISBN 978-801-7043-916-3-6.

ŽIARAN, Stanislav. Hluk a vibrácie. 1. vydání. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 1992. 191 s. ISBN 80-227-0488-1.

ŽIARAN, Stanislav. Nizkofrekvenčný hluk a kmitanie. 1. vydání. Bratislava: Vydavateľstvo STU Bratislava, 2016, 316 s. EAN 9788022745369.

MIŠUN, Vojtěch: Vibrace a hluk, Brno: PC-DIR Real s.r.o., 1998, 177 s. ISBN: 80-214-1262-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne 25. 10. 2018



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katoňický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na multiparametrickou diagnostiku generátorů v jaderné elektrárně Dukovany. Byl vybrán jeden konkrétní generátor pro řešení diplomové práce, který byl zkoumán především z praktického hlediska. V diplomové práci je rozebrán současný stav problematiky se zaměřením na hlukovou diagnostiku, vibrodiagnostiku a elektrodiagnostiku. Je kladen důraz na systémový přístup řešení. V praktické části práce je navržen experiment, tento je popsán a vyhodnocen. V rámci uvedeného je pozornost věnována závěrům z provedené vibrodiagnostiky a diagnostiky hlukové. Soubory dat jsou vyhodnoceny samostatně a je i rozebrána souvislost mezi oběma diagnostickými metodami. Dále je vyhodnocen datový soubor z elektrodiagnostiky, jsou popsány závislosti elektrických diagnostických veličin na dalších veličinách. Jsou i sledovány trendy elektrických diagnostických veličin. V diplomové práci jsou formulovány závěry a doporučení. Je konstatováno, že využití multiparametrické diagnostiky k posouzení stavu generátorů v elektrárnách pojaté systémově je teprve v počátcích a že i závěry z předkládané diplomové práce přispějí k rozvoji řešené problematiky.

ABSTRACT

The thesis is focused on multiparametric diagnostic of generators at the Dukovany nuclear power plant. One generator was chosen for the thesis and it was examined especially from the practical point of view. The thesis describes current state of the issue with focus on noise diagnostics, vibrodiagnostics and electrodiagnostics. The emphasis is on the system approach of the solution. In the practical part an experiment is designed, described and evaluated. Attention is paid to the conclusions of the performed vibrodiagnostics and noise diagnostics. Data sets are evaluated separately and the relationship between the two diagnostic methods is analyzed. Furthermore, the data set from electrodiagnostics is evaluated and dependencies of electrical diagnostic quantities on other quantities are described. Trends in electrical diagnostic quantities are also monitored. Conclusions and recommendations are formulated at the end of the thesis. It is stated that using multiparametric diagnostics to assess the status of generators in power plants is still in its beginning and that the conclusions of the submitted thesis will contribute to the development in this area.

KLÍČOVÁ SLOVA

Generátor v elektrárně, jaderná elektrárna, multiparametrická diagnostika, technická diagnostika, hluková diagnostika, vibrodiagnostika, elektrodiagnostika, systémový přístup v technické diagnostice.

KEYWORDS

Generator in power plant, nuclear power plant, multiparametric diagnostics, technical diagnostics, noise diagnostics, Vibrodiagnostics, electrodiagnostics, System approach in technical diagnostics.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BUCHTOVÁ, B. *Multiparametrická diagnostika generátoru*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2019, 63 s., Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji své rodině a všem, co mě psychicky podporovali. Dále bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Miloši Hammerovi, CSc. za vstřícný přístup při vedení této diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Miloše Hammera, CSc a s použitím literatury uvedené v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 24.5.2019

.....

Buchtová Blanka

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	17
2.1	Úvod do technické diagnostiky.....	17
2.2	Rozdělení technické diagnostiky	17
3	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	19
3.1	Hluková diagnostika	19
3.1.1	Využití hlukové diagnostiky v JE Dukovany	19
3.1.2	Měření veličiny	19
3.1.3	Podmínky způsobilosti zkušebního prostředí dle normy	21
3.1.4	Přístroje a podmínky měření.....	21
3.2	Vibrodiagnostika.....	22
3.2.1	Snímače vibrací a jejich upevnění	23
3.2.2	Základní metody vibrodiagnostiky	25
3.3	Elektrodiagnostika	29
4	SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU	33
4.1	Problémová situace	33
4.2	Formulace požadavků a cílů	33
4.3	Návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení.....	33
5	EXPERIMENT PROVEDENÝ V JE DUKOVANY	35
5.1	Popis vybraného generátoru.....	35
5.2	Popis experimentu.....	35
6	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	37
6.1	Porovnání vibrací a hluku	37
6.1.1	RMS – porovnání všech 4 kanálů.....	37
6.1.2	RMS – kanálu 2 a 3	38
6.1.3	RMS – kanálu 1 a 4	40
6.1.4	Kaskáda FFT analýzy vibrací a hluku kanálu 1 - 4	40
6.1.5	Porovnání fází vibrací s hlukem	42
6.1.6	Porovnání trendů na jednotlivých harmonických frekvencích a v pásmu +/- 5 Hz	43
6.1.7	Porovnání rychlostí vibrací měřených přenosným analyzátozem a vibrací z on-line měření	47
6.2	Vyhodnocení výsledků elektrodiagnostiky	48
7	VLASTNÍ ZÁVĚRY	55
8	ZÁVĚR	57
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	59
10	SEZNAM TABULEK, OBRÁZKŮ A ZKRATEK	61
10.1	Seznam tabulek	61
10.2	Seznam obrázků	61
10.3	Seznam zkratk	62
11	SEZNAM PŘÍLOH	63

1 ÚVOD

V průmyslové praxi se v současné době řeší otázka kvality. Jedná se o kvalitu výrobků i vlastních strojů a zařízení. V této souvislosti se do popředí dostává otázka spolehlivosti strojů a zařízení, kde dle definice spolehlivosti sem patří možnosti diagnostikovatelności, technické diagnostiky a údržby. Právě uvedené je v současné době značně zdůrazňováno, i třeba v souvislosti s rozvojem aktivit spojených s iniciativami Průmysl 4.0. Zde technická diagnostika a údržba stojí na předních místech, neboť ovlivňuje i zisk firem a také jejich konkurenceschopnost.

Technická diagnostika je v současné době již samostatnou vědní disciplínou. Je zaměřena na různé technické oblasti, neboť existuje značné množství různorodých strojů a zařízení. Dříve technická diagnostika aplikovaná v průmyslové praxi vycházela jen z malého množství diagnostických metod, a to jak z důvodu technického, tak především ekonomického. Posouzení stavu strojů tedy bylo většinou zaměřeno na vytipování rozhodujícího degradačního mechanismu a na tento byla aplikována příslušná vhodná diagnostická metoda. Tento přístup se již v posledních letech většinou nahrazuje využitím více diagnostických metod zároveň nebo nasazením několika diagnostických veličin v rámci jedné diagnostické metody, tedy rozvíjí se multiparametrická diagnostika.

Výše uvedené přístupy se dotýkají i energetiky a zařízení v ní využívaných. Významnou komponentou pro výrobu elektrické energie je generátor. Generátor je složité elektrické zařízení, které může být právě příkladem pro aplikaci nově se rozvíjející multiparametrické diagnostiky. Jedná se o synchronní stroj, kde se dříve v rámci posouzení stavu používala ve velké míře především elektrodiagnostika. Později se začala využívat i vibrodiagnostika a další diagnostické metody, jako např. diagnostika hluková. Tímto se rozvíjí snahy o dosažení co nejvyšší spolehlivosti zařízení samotných, ale i eliminace druhotných následků, např. spojených s výpadkem tohoto zařízení z provozu. Vše uvedené má značný ekonomický dopad na průmyslovou i společenskou praxi.

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na ukázkou možnosti využití multiparametrické diagnostiky v diagnostice generátoru, a to konkrétně generátoru pracujícího v ČEZ, a.s. Jaderná elektrárna Dukovany s označením TG11.

2 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Předkládaná diplomová práce je v této kapitole zaměřena na oblast diagnostiky, a to na obecné skutečnosti, jako je např. definice, cíl, důležité pojmy. Následuje rozdělení technické diagnostiky, které je nejvíce používáno v technické praxi.

2.1 Úvod do technické diagnostiky

Technická diagnostika se zabývá metodami a prostředky zjišťování skutečného technického stavu objektů v reálném čase, bez jejich demontáže nebo destrukce. Hlavním cílem je co nejvíce nahradit intuitivní a individuální přístup k určování technického stavu, přístupem exaktním a systematickým, s maximálním využitím všech relevantních informací o diagnostikovaném objektu nebo produktu.

Cílem technické diagnostiky je i stanovení kritických míst u objektů. Tyto objekty sledujeme v provozu vhodnými snímači (používá se i název čidlo, v poslední době senzor), které zaznamenávají fyzikální veličiny nějakým více či méně charakterizující poruchy, resp. jejich vznik a vývoj. Dle změn jedné nebo více fyzikálních veličin se snažíme stanovit kritérium vzniku a vývoje poruchy až do mezního stavu. Mezním stavem je například havárie či vlastní porucha. Po celou dobu sledování můžeme stroj plně využívat a plánovat dopředu opravu na základě pozorovaných změn [1,2,3,4,5,6,7].

Pro technickou diagnostiku jsou důležité následující pojmy [1]:

Diagnostická veličina: nositel informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu nebo jeho části, její hodnota je získána (naměřena) v reálném čase.

Diagnostický systém: je tvořen diagnostikovaným prostředkem, diagnostickým objektem, diagnostickou metodou (metodikou) a lidským činitelem.

Diagnóza: je vyhodnocení současného stavu diagnostického objektu.

Prognóza: je předvídání vývoje technického stavu diagnostického objektu.

Geneze: je analýza příčin poruchy nebo předčasného zhoršení technického stavu diagnostického objektu. Jinými slovy se zabývá vývojem technického stavu objektu v minulosti, zejména mechanismem vzniku poruch.

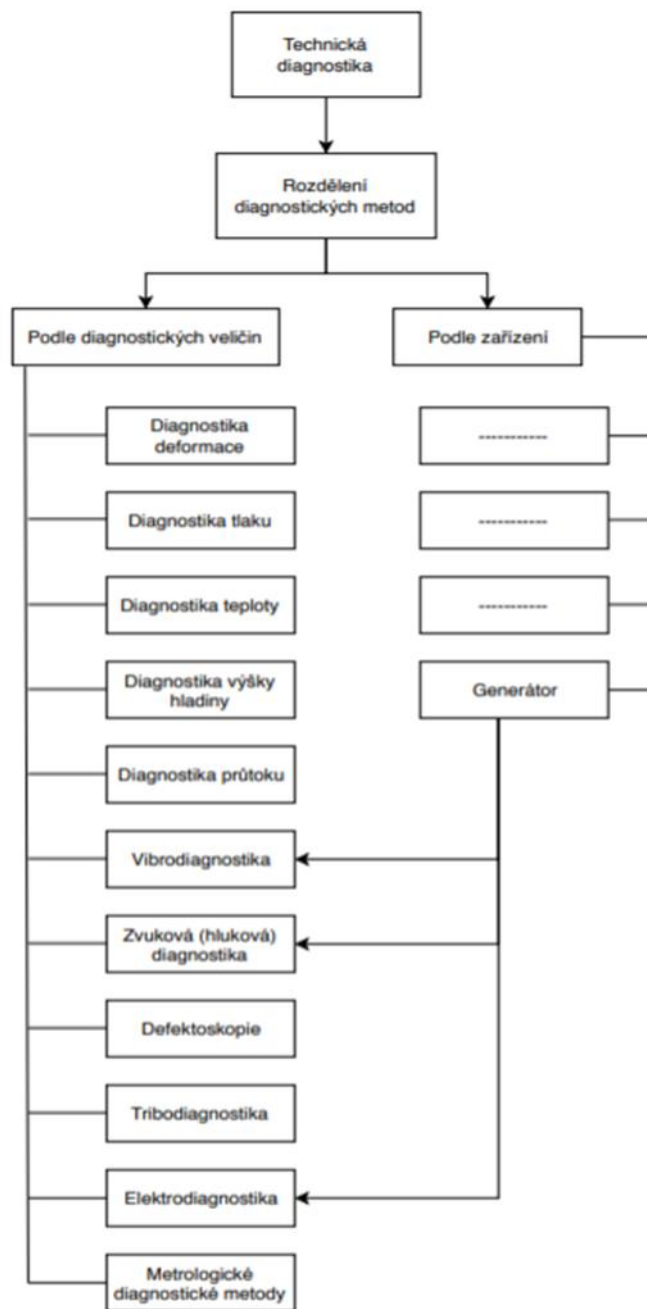
2.2 Rozdělení technické diagnostiky

Rozeznáváme základní dva typy technické diagnostiky:

1. Off-line – probíhá u zařízení mimo provoz (např. v některých případech elektrodiagnostiky) nebo i za provozu (např. vibrodiagnostika). Často také stroj či zařízení diagnostikujeme pomocí přenosného záznamového zařízení, naměřená data na místě pouze zaznamenáme, uložíme do paměti přístroje a vyhodnocujeme až s odstupem času nejčastěji přenesením dat do počítače.

2. On-line – sledování objektu probíhá trvale, také s možností průběžného vyhodnocování mezních stavů objektu. Systém okamžitě zpracovává měřená data a tyto vyhodnocuje, umožňuje tedy např. sledovat vývoj trendů měřené veličiny v čase. Složitější tzv. automatické systémy při zvýšených kritických hodnotách mohou i bezpečně zastavit zařízení a provést jeho odstávku.

Technická diagnostika se také dělí podle diagnostických veličin, ale je možné ji také rozdělit podle příslušných zařízení, které diagnostikujeme, podrobnosti jsou na obrázku 1 [8]. Multiparametrická diagnostika znamená, jak bylo již napsáno dříve, že posuzujeme stav objektu např. zároveň několika diagnostickými veličinami nebo metodami. Příkladem může být použití vibrodiagnostiky, elektrodiagnostiky a hlukové diagnostiky pro v diplomové práci diagnostikovaný generátor (proto je ve schématu uveden). Schéma na obrázku 1 je obecné, podle zařízení můžeme ve schématu uvést např. čerpadlo, ventilátor apod., to však již není předmětem řešení předkládané diplomové práce.



Obr. 1) Schéma rozdělení technické diagnostiky

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V předkládané diplomové práci je pozornost soustředěna na diagnostické metody dle zadání práce, tedy na hlukovou diagnostiku, vibrodiagnostiku a elektrodiagnostiku. Popis je proveden tak, že je nejprve pojednáno obecně o teorii příslušné diagnostické metody a potom následuje rozbor aplikace dané diagnostiky v JE Dukovany.

3.1 Hluková diagnostika

Nejčastěji v hlukové diagnostice zkoumáme nežádoucí akustické signály, které nazýváme hlukem. Hluk strojů většinou signalizuje, že stroj není v pořádku, což nám ve výsledku může ovlivnit např. přesnost strojů a obecně kvalitu. Z tohoto vyplývá, že pomocí akustických parametrů můžeme zjišťovat a následně určit technický stav stroje.

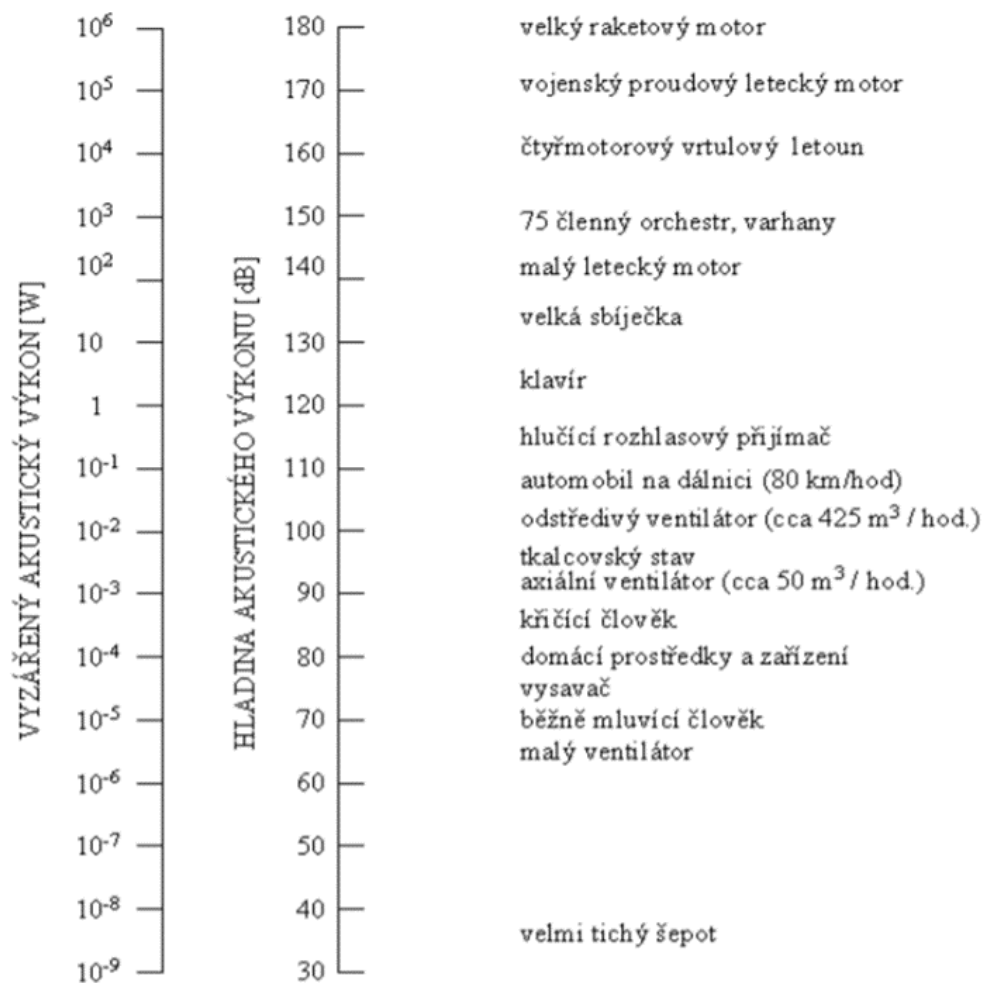
Dalším důležitým faktorem, proč se hluková diagnostika v poslední době dostává do popředí, je zkoumání škodlivého působení hluku na člověka. Toto téma se nyní řeší v legislativě, v zákonech, v normách a jiných právních předpisech, které vznikly pro ochranu lidí v oblasti komunální hygieny, tak i na pracovišti. Toto téma však není předmětem předkládané diplomové práce.

3.1.1 Využití hlukové diagnostiky v JE Dukovany

Hlukovou diagnostiku využívá i JE Dukovany. Zde se nasazuje off-line hluková diagnostika, kterou provádí externí firma. Externí firma v pravidelných intervalech nainstaluje potřebné diagnostické prostředky a provede záznam měření po určitý časový interval. Poté všechna data vyhodnocuje ve svém sídle a následně pošle zpracovaný protokol i s doporučeními do JE Dukovany. Off-line diagnostika se v tomto případě logicky provádí při provozu zařízení. Při měření a následné analýze hlukové diagnostiky se vychází z české technické normy [9] a příslušných dokumentů, které jsou používány ve firmě ČEZ a.s. (podrobnosti jsou dále). V dalších kapitolách jsou popsány měřené veličiny, podmínky způsobilosti zkušebního prostředí dle normy a přístroje i podmínky měření, a to včetně ukázky zpracovaného protokolu z diagnostiky.

3.1.2 Měřené veličiny

1. Hladina akustického výkonu (L_w) je vyjádřena jako desetinásobek dekadického logaritmu poměru akustického výkonu k referenčnímu akustickému výkonu vyjádřena v dB. Další podrobnosti jsou uvedeny v příslušné normě.
Každé zvýšení akustického výkonu o jeden řád odpovídá zvýšení akustické hladiny akustického výkonu o 10 dB. Na obrázku 2 je zobrazená stupnice akustického výkonu a jeho hladin na příkladu činností, pro lepší orientaci a představu.



Obr. 2) Příklady hladin akustického výkonu [9]

2. Dále dle definice rozlišujeme dva druhy hladin akustického tlaku:

- Hladina akustického tlaku (L_p) je dvacetinásobek dekadického logaritmu poměru akustického tlaku k referenčnímu akustickému tlaku opět vyjádřen v dB.
- Hladina akustického tlaku A na ploše (\bar{L}_{pA}). Průměrná hladina akustického tlaku vážená funkcí A na měřicí ploše, kde měřicí plocha představuje hypotetickou plochu obklopující zdroj, na níž jsou umístěna měřicí místa o velikosti S, hodnotu vyjadřujeme v dB.

Předmětem normy [9] není jen hluk vyzařován z parních turbín (jak uvádí norma), ale i strojů k pohánění turbín, což je náplní této diplomové práce (konkrétně se jedná o již uváděný generátor TG 11).

Při dodržení postupů měření dle uváděné normy můžeme dostat maximálně tyto odchylky:

1. Na zdroje vyzařující zvuk, v němž jsou obsaženy význačné diskrétní tóny - 5 dB.
2. Na zdroje vyzařující zvuk rovnoměrně rozložený ve sledovaném kmitočtovém rozsahu 4 dB.

3.1.3 Podmínky způsobilosti zkušebního prostředí dle normy

Měření popisované v této práci probíhalo v prostředí, ve kterém je volné pole nad odrazivou rovinou. Odrazivé předměty a roviny byly přemístěny do největší možné vzdálenosti od zkušebního zdroje (generátoru TG 11).

Zkušební zdroj se nachází v uzavřeném prostředí, proto ve výpočtu akustické hladiny musíme využít tzv. korekci prostředí K udávanou v dB. Nyní jsou diagnostické prostředky na vysoké technické úrovni, jako v našem případě, že korekci prostředí K si stanovují sami na základě měření. Proto při vyhodnocování a analýze neuvádíme a složitě neurčujeme tuto hodnotu korekce. Program to již dělá plně automaticky. V případě, že bychom potřebovali sami určit korekci, je postup podrobně popsán v normě [9].

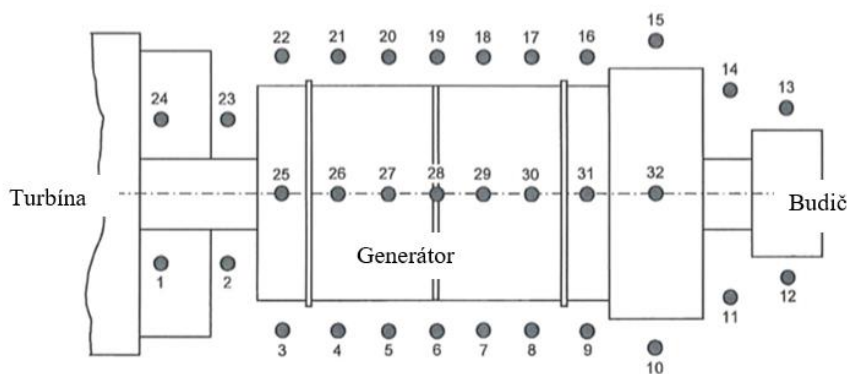
3.1.4 Přístroje a podmínky měření

Pro diagnostiku využíváme zvukoměry, které vyhovují požadavkům IEC 651, s časovou charakteristikou „slow“. Pro omezení vlivu pozorovatele na měření externí firma využívá kabel mezi mikrofon a zvukoměr. Taktéž před každým vykonáním zkoušky je provedena kalibrace pomocí akustického kalibrátoru o přesnosti $\pm 0,5$ dB, kterým se zkontroluje kalibrace celého měřicího systému, včetně použitého kabelu, na jednom či více použitých kmitočtech (kde jeden z kalibračních kmitočtů se pohybuje v rozsahu od 250 do 1000 Hz).

Před každým měření musí pracovat generátor v ustálených provozních podmínkách. Zkouška se provádí při jmenovitém zatížení, otáčkách a výstupních podmínkách. Obvykle je vhodné měření opakovat při ustálených zátěžných podmínkách 25 %, 50 %, 75 % a 100 % jmenovitého zatížení [10].

Měření akustického tlaku A

Konstrukce referenční, měřicí plochy a rozložení poloh mikrofonů musí být jasně popsáno v protokolu o měření. Místa mikrofonů leží na měřicí ploše s hypotetickým obsahem S, která obklopuje zdroj stejně jako referenční rovnoběžnostěn a je zakončena na odrazivé rovině. Tvar měřicí plochy je sestaven z pravoúhlých rovnoběžnostěnů, jejichž stěny jsou ve vzdálenosti d rovnoběžné se stěnami referenčních rovnoběžnostěnů. Rozmístění mikrofonů je zobrazeno na obrázku 3.



Obr. 3) Schéma rozmístění mikrofonů

Měření probíhá ve 32 bodech dle obrázku 3. Mikrofon při zkoušce v bodech $1 \div 24$ je umístěn 1,5 m nad provozní podlahou generátoru a ve vzdálenosti $d = 0,3$ m od zařízení pod kompletním zvukoizolačním krytem. Podélná osa mikrofону je směřována vždy kolmo k povrchu referenční obalové plochy, v bodech 1 a 24 kolmo k zadní stěně NT dílu turbíny. Ve všech měřicích bodech je měřena vážená hladina akustického tlaku A , při provozu turbosoustrojí TG11 na provozní výkonové hladině $P = 239$ MW, $Q = 48,7$ MVar a otáčkách $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ po dobu $t = 40$ s. Při měření se tvoří tzv. record, což je zaznamenaný průběh signálu uložen v měřicím zařízení pro pozdější zpracování (analýzu). Údaje se dále použijí pro výpočet hladiny akustického tlaku na ploše a hladiny akustického výkonu. Na měření můžou působit nepříznivě některé podmínky jako např. silné elektrické či magnetické pole, vítr, nárazy vzduchu nebo páry vypouštěné zkoušeným strojem, vysoké nebo nízké teploty) toto nepříznivé ovlivnění musíme zvážit dopředu, než určíme polohy mikrofónů. Hladiny akustického tlaku při měření sledujeme pro jejich typickou pracovní periodu stroje. V JE Dukovany probíhá měření v lednu, květnu a červenci, kde se měří vždy jeden den. Hladiny akustického tlaku A se měří na každém měřicím místě.

Z každého měření se zpracovává protokol. V každém protokolu o měření musí být obsaženy následující fakta:

1. Seznam použitých přístrojů a zařízení využitých pro měření (přiložený kalibrační a ověřovací list)
2. Stanovení nejistoty měření
3. Stanovení odborného stanoviska / interpretace
4. Kdo provedl záznam a vyhodnocení
5. Razítko, podpis
6. Popis měření
7. Podmínky měření

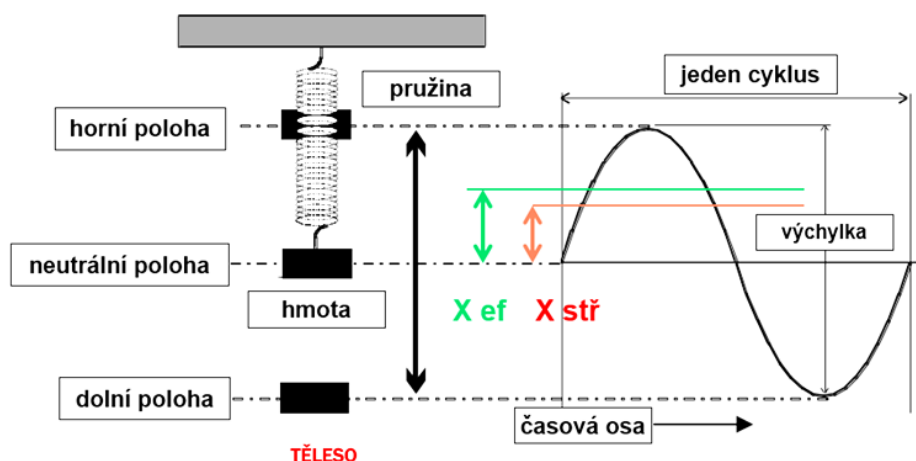
Ukázka protokolu měření je v příloze 1.

3.2 Vibrodiagnostika

Vibrace se objevují u všech strojů. Vibracím se tedy nelze v provozu vyhnout. Zdrojem vibrací mohou být např. dynamické namáhání stroje, technický stav ložisek, hřídelí, převodovek, nevyvaha či nesouosost stroje a mnoho dalších. Na obrázku 4 je teoretický příklad vibrací, které vzniknou vychýlením tělesa z neutrální polohy. V obrázku jsou označeny i některé důležité veličiny, jako efektivní hodnota (X_{ef}), střední hodnota ($X_{střed.}$), dále obecná výchylka, jeden cyklus vibrací a neutrální, horní a dolní poloha tělesa.

Diagnostika, která se zabývá zkoumáním vibrací, se nazývá vibrodiagnostika. Vibrodiagnostika pomáhá při objektivním určování technického stavu rotujících strojů.

V dalším textu jsou popsány snímače vibrací a jejich upevnění (3.2.1), potom základní metody vibrodiagnostiky (3.2.2).



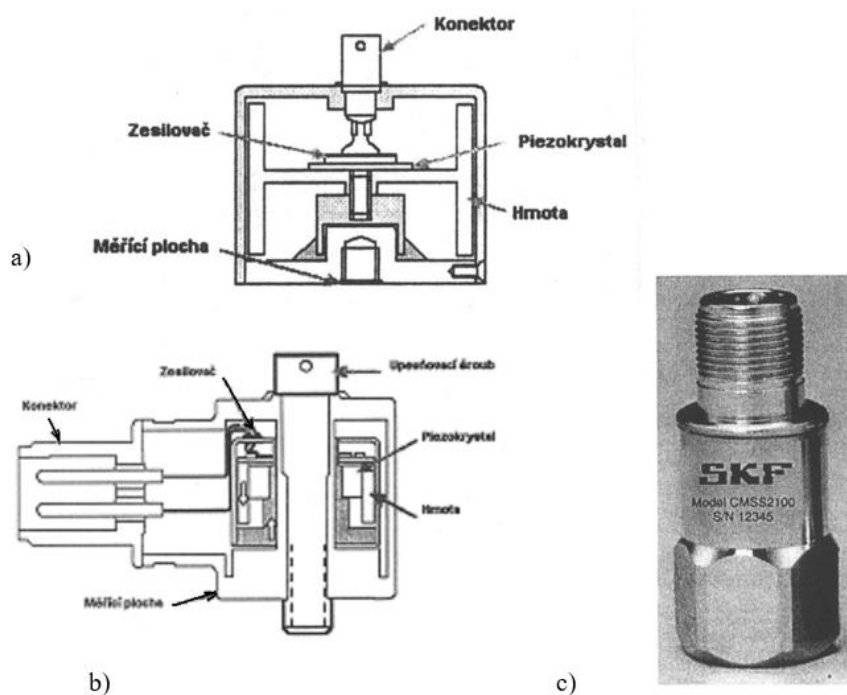
Obr. 4) Schéma vibrací [11]

3.2.1 Snímače vibrací a jejich upevnění

Vibrace se snímají pomocí snímačů (čidlo, dnes nejvíce používaný název senzor). Výběr snímačů závisí na dané konkrétní aplikaci, tzn. měřené veličině (výchylka, rychlost, zrychlení) vibrací, zda měříme relativní či absolutní vibrace, zda měříme nízkofrekvenční nebo vysokofrekvenční vibrace.

Snímače rozdělujeme:

- Snímače výchylky – výstup snímače je úměrný relativní výchylce vibrací mezi rotujícími a nerotujícími elementy stroje. Využíváme je především u velkých rotujících strojů, zejména tam, kde je nezbytné měřit výchylku mezi rotorem a statorem
- Snímače rychlostí – zařízení, které generuje napět'ový signál úměrný vibrační rychlosti tělesa. Opět se montují na nerotující části konstrukcí strojů.
- Snímače zrychlení (akcelerometry) – zařízení, které generuje signál, úměrný vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. Akcelerometry pracují na různých principech. Rozeznáváme např. akcelerometry tlakové a smykové. Jejich schématické provedení je na obrázku 5, skutečné provedení je rovněž na tomto obrázku. [12].

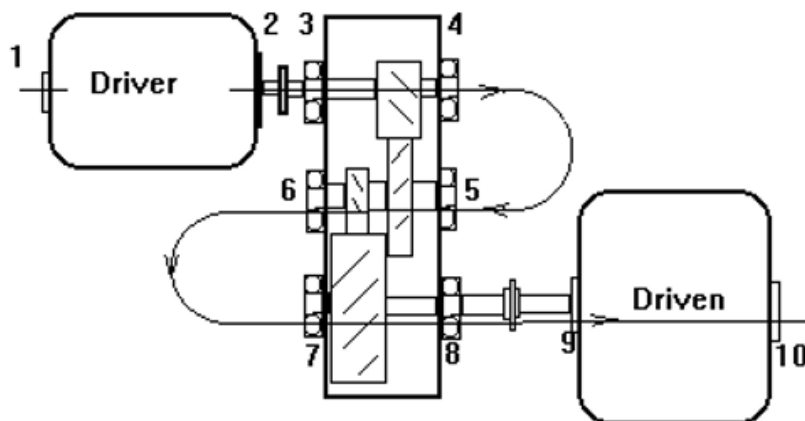


Obr. 5) Akcelerometry: a) tlakový b) smykový c) skutečné provedení

Důležitým faktorem je také správné připevnění snímačů vibrací. Touto problematikou se zabývá norma [19]. Nesprávné upevnění nám nejvíce ovlivní frekvenční odezvu snímače při měření vysokých frekvencí. Také jsou důležité základní zásady pro volbu měřicího místa, což je popsáno dále níže.

Základní zásady pro volbu měřicího místa [12]:

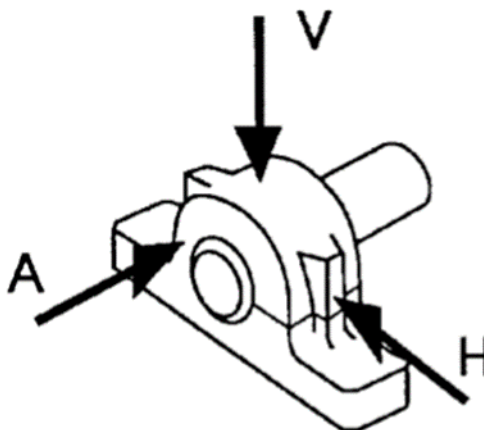
- Umístění snímačů typických strojů vycházejí z provozních zkušeností (doporučení např. příloha ČSN ISO 13371-1) a jsou většinou v blízkosti ložisek.
- Umístění snímačů je na nerotujících částech konstrukce, nejčastěji na ložiskovém domku nebo ložiskovém stojanu.
- Orientace a označení snímačů musí být jednoznačné pro zajištění opakovatelnosti měření a mělo by se řídit danou konvencí, kterou lze vidět na obrázku 6.



Obr. 6) Schéma umístění snímačů měření [11]

- Měření je nutné provádět za provozních podmínek (ustálená a normální). U strojů s proměnlivými otáčkami nebo zatížením se měření provádí při mezních podmínkách.

Nejčastěji vibrace měříme ve třech směrech – vertikálním, horizontálním a axiálním, jak je možné sledovat na obrázku 7 níže. V horizontálním směru se projevují vibrace nejvíce. Vibrace v horizontálním směru mohou ukazovat na nevyváženost stroje. Naopak vibrace ve vertikálním směru ukazují na tuhost konstrukce a na menší gravitaci. Vibrace v axiálním směru znázorňují především nesouosost a ohnutí hřídele.



Obr. 7) Ukázka os měření vibrací [11]

Důležitým nástrojem vibrodiagnostiky je samozřejmě časová analýza měřeného signálu, ale v průmyslové praxi se nejvíce používá analýza frekvenční.

3.2.2 Základní metody vibrodiagnostiky

Jak bylo uvedeno, hlavním nástrojem vibrodiagnostiky je frekvenční analýza.

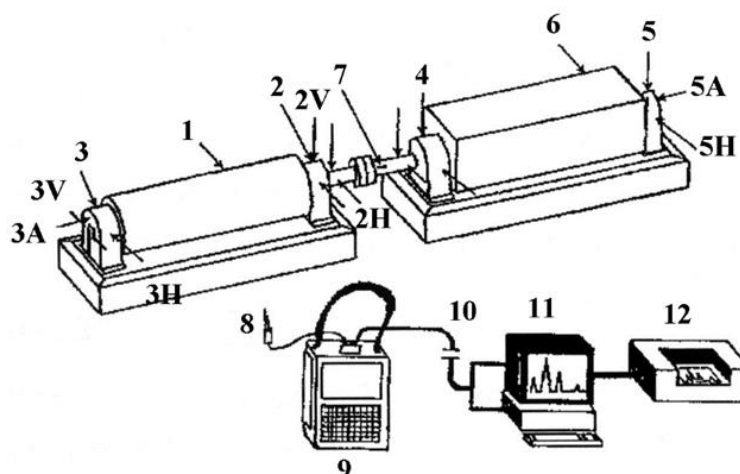
Frekvenční analýza pomocí FFT

Frekvenční analýza pomocí FFT je základní analytická metoda, která hledá periodické děje, které potom zobrazuje v daném souřadnicovém systému. Při měření a následném vyhodnocování využíváme následující vyjádření [12]:

- Špička (peak) – vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní
- Špička – špička (peak – to – peak, někdy také rozkmit) je vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem vlny (2 x špička)
- Průměrná hodnota (Average), jelikož většina průběhů nemá ideální sinusový průběh, tak je průměrná hodnota nenulová (0,637 x špička)
- Efektivní hodnota (RMS – root mean square value). Je odvozena matematickou cestou (FFT – druhá odmocnina čtverců okamžitých hodnot), jinak při porovnání energie nebo výkonu stejnosměrného a střídavého proudu. (0,707 x špička u ideální sinusové křivky). Jedná se o nejčastější vyjádření.

Pro určení objektivního technického stavu diagnostikovaného objektu, při frekvenční analýze vždy rotujícího objektu, je nutný následující postup [12,13,14,15,16,17,18]:

- Výpočet frekvencí zdrojů buzení – určení rotorových, zubových, ložiskových, lopatkových apod. frekvencí. Pro výpočet těchto budících frekvencí je nutná znalost kinematického schématu objektu a celá řada technických údajů (počty zubů, otáčky, počty lopatek apod.) a pro podrobnou analýzu např. vnitřní rozměry valivých ložisek, počty rotorových tyčí apod., které ne vždy jsou běžně dostupné.
- Zpracování metodiky měření, kterou lze shrnout do následujících bodů:
 - Volba snímače vibrací – univerzální použití v širokém frekvenčním rozsahu má akcelerometr
 - Určení měřicích míst – volit co nejbližše ložisek, co nejméně přechodů atd.
 - Způsob uchycení snímače – cenově a kvalitativně nejvhodněji způsob je lepená podložka
 - Volba měřicích směrů – ideální je měření ve třech směrech (H – horizontální, V – vertikální, A – axiální), každopádně ve třech směrech provádět měření v okolí spojky (motor – převodovky)
 - Volba časového okna a frekvenčního rozsahu měření – nejčastěji Hanning (není známa ani amplituda, ani frekvence složek signálu) a frekvenční rozsah, doporučuje se, aby pokrýval 0,2násobek nejnižší otáčkové frekvence do 3,5násobku nejvyšší sledované frekvence buzení a obecně nepřekročil 10 kHz, ale nejčastěji rozsah 0-1000 Hz a řešil otázku frekvenční lupy (ZOOM)
 - Určení měřené veličiny – nejčastěji průměrná efektivní hodnota (RMS)
 - Určení měřicího přístroje a způsobu monitorování vibrací – tzn. rozhodnout o tom, zda nasadíme kontinuální, či periodický nebo kombinovaný způsob sledování diagnostikovaného objektu. Uvedené rozhodnutí nám dá odpověď na otázku, zda musíme použít: -trvale instalované měřicí systémy (ON-LINE), - částečně trvale instalované měřicí systémy (semitrvalé), resp. kombinace, tzn. snímače jsou instalovány trvale a sběr dat je prováděn periodicky, - přenosné monitorovací systémy- obrázek 8.



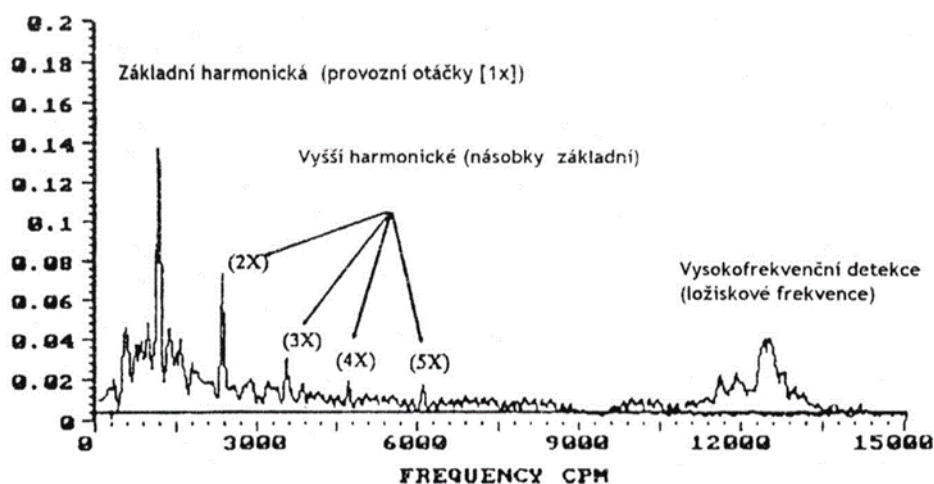
Obr. 8) Typický přenosný monitorovací systém [12]

Kde: 1 – hnací stroj (pohon), 2 – (2 V, 2 H) měřicí místa hnacího stroje na straně spojky, 3 – (3 V, 3 H, 3 A) měřicí místa hnacího stroje, 4 – (4 V, 4 H) měřicí místa procesního stroje na straně spojky, 5 – (5 H, 5 A) měřicí místa procesního stroje, 6 – poháněný procesní stroj, 7 – fázová

reference, 8 – snímač vibrací, 9 – přenosný sběrač dat (datakolektor), 10 – připojení počítače, 11 – počítač s vyhodnocovacím software, 12 – tiskárna

Provedení provozních měření, resp. provedení měření in situ, tzn. přímo na diagnostikovaném objektu. Je nutno dodržet pouze základní podmínku, provést měření diagnostikovaného objektu za opakovatelných a ustálených provozních podmínek. U některých strojů lze provádět měření i při chodu naprázdno, resp. minimálních či maximálních otáčkách apod., abychom eliminovali proměnné otáčky zatížení apod.

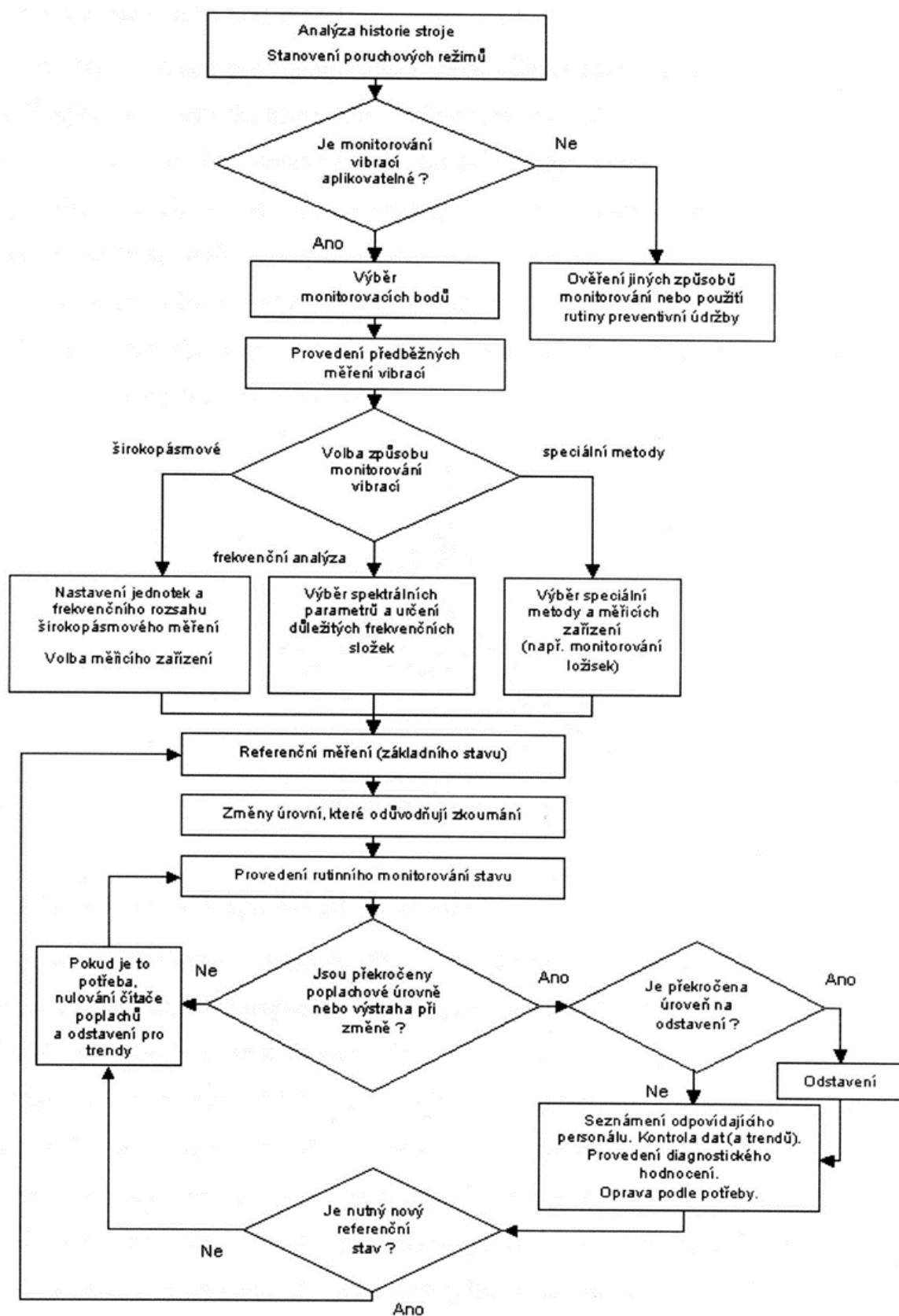
Každá frekvenční špička ve spektru koresponduje se silami, které vznikají při provozu diagnostikovaného objektu, nebo jsou jejich kombinací, takže vlastně hledáme mechanickou příčinu vibrací-obrázek 9, které by měly vyjádřit to, že následně mluvíme např. o nevyváženosti, nesouososti, poruše ozubeného převodu apod.



Obr. 9) Frekvenční spektrum [12]

Využíváme tedy tvrzení, že každá závada generuje vibraci o dané frekvenci.

Interpretace a analýza naměřených dat má svůj základ v algoritmu uvedeném na obrázku 10, ze kterého by mělo jednoznačně vyplynout nejen to, o čem už byla zmínka, ale také, že pro interpretaci frekvenčního spektra musíme hledat základ již v první odrážce – výpočet frekvencí zdrojů buzení (str.25).

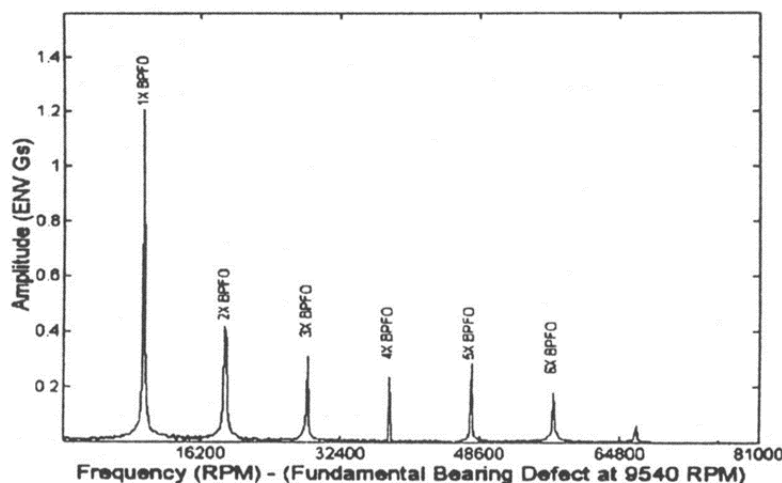


Obr. 10) Možná varianta algoritmu pro monitorovací program vibrací [12]

Dalším nástrojem vibrodiagnostiky je obálková metoda.

Obálková metoda (Envelope)

Ložiska a záběry ozubených kol mají opakující charakter, vytváří tedy signál s nižší amplitudou a vyšší frekvencí oproti vibračním signálům buzených otáčkami či konstrukcí. Pokud se u ložiska objeví defekt na vnější dráze, potom každý valivý element procházející tímto bodem vyvolá opakující se signál o určité frekvenci odpovídající závadě na ložisku. Signál má ale nízkou energii, proto se při běžném měření může zcela ztratit jako šum či v dalších budících otáčkových frekvencích. Příklad měření je na obrázku 11 [12].



Obr. 11) Příklad obálkového spektra vnějšího kroužku valivého ložiska

Ve vibrodiagnostice lze použít i on-line diagnostiku.

V JE Dukovany se využívají obě metody. Realizuje se důsledně off-line diagnostika, ale i diagnostika on-line pro vybrané případy.

Pro tuto diplomovou práci byla poskytnuta firmou JE Dukovany data z obou metod, ale jsou v práci zpracována data z off-line diagnostiky.

3.3 Elektrodiagnostika

Elektrodiagnostika patří také k základním diagnostikám strojů a zařízení. Používá se většinou k hodnocení částí elektrických systémů strojů (např. vinutí elektrických strojů) a zařízení s využitím typických metod. V těchto metodách se jedná především o tyto diagnostické veličiny: izolační odpor, napěťová závislost izolačního odporu, ztrátový činitel, kapacita, časová konstanta, částečné výboje apod. Tento přístup se výhradně používal v minulosti v rámci elektrodiagnostiky. Nyní se k tomuto ještě začíná prosazovat měření i tzv. dynamické elektrodiagnostiky, která se zabývá například analýzou symetrie napájecího proudu a napětí, analýzou spekter těchto veličin apod.

V elektrodiagnostice se využívá také obecně off-line i on-line přístupů [20,21,26]. V JE Dukovany se vychází jak z on-line diagnostiky, tak z off-line diagnostiky, kde se řeší uvedené. V práci je využíváno převážně hodnot z off-line diagnostiky.

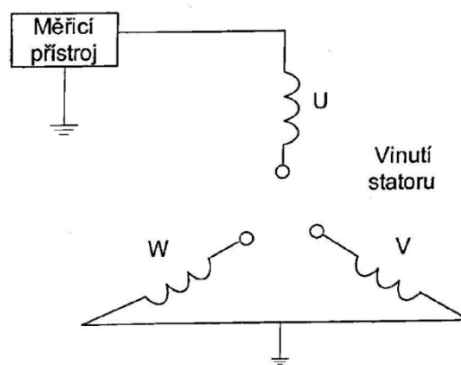
V dalším textu jsou stručně popsány některé diagnostické veličiny, které jsou předmětem řešení předkládané diplomové práce.

A. Izolační odpor statorového vinutí

Izolační odpor statorového vinutí je odpor izolace vinutí statoru. Izolační odpor se ve své podstatě měří ohmickou metodou. Základní jednotkou izolačního odporu je $M\Omega$, veličina se měří a odečítá v závislosti na čase. Nejčastěji se stanovuje hodnota izolačního odporu pro 15, 60, 120 až 600 s po připojení měřicího napětí.

Postup měření:

Měřenou fázi je nutno před měřením po dobu nejméně 30 minut zkratovat pro odvedení elektrického náboje. Ostatní neměřené fáze se na vstupu uzemní a druhý konec fáze zůstane nezapojený. Měřicí napětí $1 \div 5$ kV přiložíme na vstup měřené fáze. Měřené vinutí je připojeno na záporný pól zdroje napětí a kladný pól zkušebního zdroje se připojí na kostru stroje pomocí vodivého spojení se zemí a ostatními vinutími, jak je vidět na obrázku 12. Poté odečítáme hodnoty izolačního odporu v předem určených časech po připojení měřicího napětí. Měření opakujeme pro všechny fáze samostatně. Několikafázové vinutí, u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na zvláštní svorky, se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny [20,21,22,23,24].



Obr. 12) Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí [20]

Z naměřených hodnot izolačního odporu se dále může stanovit výpočtem jednodinutový a desetiminutový polarizační index p_i [-]. Jako příklad lze uvést výpočet desetiminutového polarizačního indexu dle vztahu $p_{i600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}}$ [-], kde R_{iz60} je hodnota izolačního odporu v $M\Omega$ odečítaná v čase 60 s po zapojení měřicího napětí. R_{iz600} vyjadřuje hodnotu izolačního odporu v $M\Omega$, která se odečítá v čase 600 s po zapojení měřicího napětí.

Hodnoty izolačního odporu a polarizačního indexu nám nejvíce ovlivňuje absorpce vlhkosti, znečištění stroje, produkty degradace izolačního systému či konstrukce stroje. Jestliže:

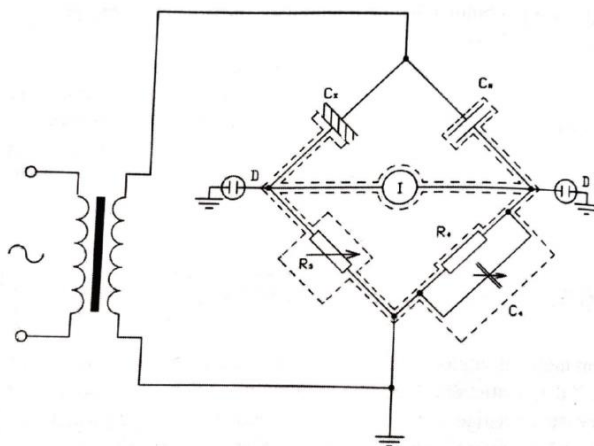
$P_i > 2$: může se jednat o kvalitní, nenavlhlou a nedegradovanou izolaci

$P_i \approx 1$ může se jednat o izolaci navlhlou, znečištěnou či degradovanou.

Samozřejmě se také může měřit i izolační odpor rotorového vinutí, ale v této práci toto není popisováno.

B. Ztrátový činitel δ , kapacita a časová konstanta statorového vinutí

Jedna z důležitých zkoušek elektrických strojů je střídavá zkouška měření ztrátového činitele a kapacity. Tyto veličiny se v průmyslové praxi měří Scheringovým můstkem. Jeho schéma zapojení je na obrázku 13. Další podrobnosti jsou uvedeny v literatuře [20,21].



Obr. 13) Schéma Scheringova můstku [20]

Z naměřených hodnot se také dá vypočítat velikost časové konstanty. Například výpočet desetiminutové časové konstanty se provede podle vztahu $\tau_{600} = R_{iz600} * C_{0,2U_{fn}} [-]$, kde R_{iz600} je izolační odpor v $M\Omega$ odečtených v čase 600 s po připojení měřicího napětí. C je kapacita vinutí měřené fáze střídavého generátoru (motoru) v μF při $0,2 * U_{fn}$, kde U_{fn} je jmenovitá hodnota fázového napětí.

C. Napěťová závislost izolačního odporu vinutí na stejnosměrném napětí

Při tomto měření závislosti nám vzrůstá velikost odporu až na jistou ustálenou mez danou vodivostí dielektrika. Na rozdíl od postupu zkoušky napěťové závislosti na izolačním odporu tento odpor se zvyšujícím se napětím klesá. Hodnota izolačního odporu je téměř konstantní do určité hodnoty stejnosměrného napětí, poté začne jeho hodnota klesat. Při dalším zvyšujícím se napětí se izolační odpor nadále zmenšuje až k nulovým hodnotám, při kterých dochází k průrazu izolace.

V praxi se provádí měření ještě dalších veličin. Vzhledem k použití v diplomové práci jsou rozebrány veličiny jenom popisované v textu výše.

Jak je uvedeno dříve, pro posouzení stavu stroje se v současné době začíná používat multiparametrická diagnostika. Zde je důležitá i elektrodiagnostika, která bývá často její součástí. Bývá využívána ve značné míře multiparametrická diagnostika při použití několika metod technické diagnostiky, jako např. v této kombinaci:

- Vibrodiagnostika + tribodiagnostika + termodiagnostika
- Vibrodiagnostika + tribodiagnostika + elektrodiagnostika

- Vibrodiagnostika + elektrodiagnostika + hluková diagnostika

V předkládané diplomové práci je využívána pro posouzení stavu sledovaného generátoru kombinace vibrodiagnostiky, hlukové diagnostiky a elektrodiagnostiky.

4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na poměrně složitý problém, a to možnost aplikace multiparametrické diagnostiky na důležité energetické zařízení – generátor. Proto je třeba k problému přistupovat komplexně a systémově. Tato kapitola má naznačit postup řešení, aby se dospělo ke splnění zadaných cílů diplomové práce.

4.1 Problémová situace

Technická diagnostika by měla být více či méně, jak je naznačeno v úvodu diplomové práce, nedílnou součástí každé výrobní společnosti. Mění se i přístupy k uvedenému, je třeba se v současné době zaměřit na diagnostiku multiparametrickou. Je nutné využít výhody doposud používaných diagnostických metod, je důležité se zaměřit na nové přístupy, aby se získaly seriózní a komplexní informace o stavu i v energetice existujících zařízení. K těmto patří i generátory pro výrobu elektrické energie.

V JE Dukovany k tomuto problému přistupují zodpovědně, provádí důsledně on-line a off-line diagnostiku, např. vibrační a vybraných elektrických veličin. Každou z těchto diagnostik ale zatím zpracovávají a vyhodnocují zvlášť. Dále v pravidelných intervalech provádí hlukovou diagnostiku, kterou pro ně zpracovává externí firma.

Právě ve výše popsáném se objevuje problém, který by mohl být řešen a vyřešen důsledným systémovým rozбором a přístupem. Samozřejmě za použití i nových a moderních přístupů a postupů.

JE Dukovany se především v poslední době začíná systémovým řešením multiparametrické diagnostiky zabírat zodpovědně, snaží se najít komplexní metodu a metodiku pro posouzení stavu všech svých zařízení (a to nejen generátorů, ale i transformátorů a dalších). Tímto se snaží získat lepší a erudovanější přehled o stavu a obecně o spolehlivosti zařízení. Toto by umožnilo především plánovat efektivněji údržbu, generální opravy apod. I když je před pracovníky JE Dukovany hodně činnorodé práce, každý přínos je pozitivní a inspirativní. K tomu má přispět i předkládaná diplomová práce, proto takto byly i formulovány její cíle.

4.2 Formulace požadavků a cílů

Požadavky diplomové práce vychází z cílů, které jsou uvedeny v zadání práce. Cílem diplomové práce je popsání a zhodnocení současného stavu diagnostiky ve firmě JE Dukovany, dále naplánovat v rámci možností experiment a tento vyhodnotit a formulovat vlastní závěry. Vše dle skutečností z textu v kap. 4.1.

4.3 Návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení

Pro řešení diplomové práce byl za pomoci zaměstnanců vybrán jako diagnostický objekt generátor s označením TG11 a dále bylo navrženo využít a zpracovat data z vibrodiagnostiky, hlukové diagnostiky a elektrodiagnostiky, která se firma JE Dukovany uvolila poskytnout pro potřeby této diplomové práce.

5 EXPERIMENT PROVEDENÝ V JE DUKOVANY

Součástí diplomové práce je experiment, který byl za pomoci zaměstnanců firmy JE Dukovany v rámci možností naplánován a realizován. Experiment vychází ze skutečností popsaných dříve, rovněž jeho vyhodnocení a formulace vlastních závěrů.

V dalším textu je nejprve popsán vybraný generátor z hlediska parametrů, dále je popsán realizovaný experiment a nakonec jsou uvedeny výsledky experimentu.

5.1 Popis vybraného generátoru

Pro diplomovou práci byl vybrán generátor s označením TG11, který je umístěn ve výrobním bloku 1, přesněji ve strojovně 1 v JE Dukovany. Provozovatelem tohoto generátoru je firma ČEZ a.s. a výrobcem byla společnost BRUSH SEM s.r.o. V dalším jsou uvedeny technické parametry zkoumaného generátoru, které uvádí tabulka 1.

Tab 1) Technické parametry generátoru TG11

	Hodnota	Jednotka
Napětí na statoru	15,75	kV
Proud statoru	10 997	A
Výkon	300	MVA
Otáčky	3000	1/min
Frekvence	50	Hz
Účinník	0,85	-
Zapojení vinutí	Y	-

5.2 Popis experimentu

Dne 7.12.2018 proběhlo v JE Dukovany měření hluku a vibrací na generátoru TG11. Při měření bylo využito těchto diagnostických prostředků (přístrojů):

1. Přesný integrační zvukoměr B&K 2236, v.č měřícího mikrofónu B&K 4188, v.č akustického kalibrátoru B&K 4231

2. Analyzátor vibrací, typ ADASH VA4 PRO

Integračním zvukoměrem byl měřen hluk v rozsahu od 50–130 dB. Na přístroji ADASH VA4 PRO byly využity 3 kanály na zaznamenávání vibrací a jeden kanál na záznam hluku. Dále pro zpracování kompletní analýzy byla využita data z off-line diagnostiky pro doplnění dat navrhované multiparametrické diagnózy. Data pro hluk a vibrace jsou ze dne 7.12.2018 a jsou zaznamenány ve stejný čas. Datový soubor byl vyhodnocován pomocí počítačového programu s označením DDS, který byl ve firmě k dispozici a navíc s tímto programem bylo pracováno na FSI v rámci výuky předmětu Technická diagnostika II. V DDS programu se provedlo potřebné zpracování datového souboru, tedy např. vykreslení RMS průběhů, spekter, kaskád, trendů a jiné.

Poněkud organizační problém byl v otázce realizace elektrodiagnostiky, datový soubor byl získán z jiných diagnostických šetření. Jednalo se sice o stejný generátor, ale diagnostika proběhla v jiném časovém úseku. Proto byla data analyzována pouze z hlediska jejich vývoje v čase.

Právě i výše uvedené by mohl odstranit systémový přístup, který je naznačen v kap.4 a i navržen v kap.7.

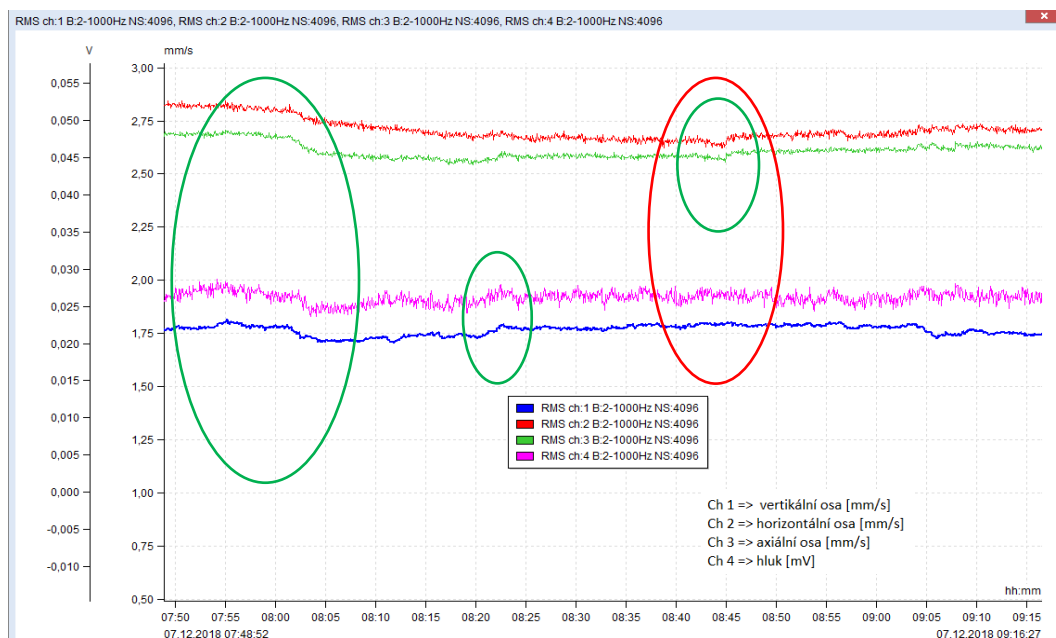
6 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Experiment byl proveden podle kap.5 na generátoru TG 11. Měření bylo realizováno na ložisku NDE (strana budiče generátoru – not drive end) strany generátoru, tříosým snímačem, kde kanál 1 byl ve vertikálním směru, kanál 2 v horizontálním směru a kanál 3 v axiálním směru. Na kanálu číslo 4 byl připojen výstup z hlukového mikrofону, který má analogový výstup v milivoltech (není cejchovaný v jednotkách pro hladinu hluku).

6.1 Porovnání vibrací a hluku

Nyní budou rozebrány výsledky pro hodnoty získané pomocí analyzátoru vibrací ADASH VA4 PRO, který byl stručně popsán v kap.5.2., a to včetně dalších podrobností k vlastní realizaci měření.

6.1.1 RMS – porovnání všech 4 kanálů



Obr. 14) RMS průběhy hluku a vibrací

Průběhy hluku (mV) a průběhy rychlostí [mm/s] jsou graficky znázorněny v závislosti na čase dle obrázku 14. Na kanálech 1-3 byly zaznamenávány vibrace v ose vertikální, horizontální a axiální, poslední kanál 4 byl využit pro záznam hluku. Porovnání časového průběhu, který byl sledován v délce přibližně 85 minut je vidět velmi podobná závislost mezi prvním kanálem vibrací (vertikální směr) a čtvrtým kanálem RMS hodnotou měřeného hluku (hodnota hluku je pouze analogový napěťový výstup z měřicího snímače B&K, z důvodu, že měřený přístroj nebylo možné zkalibrovat na měřenou hodnotu hluku). Další podobnost s časovým průběhem hluku můžeme vidět i u kanálů dva (horizontální směr) a kanálu tři (axiální směr).

Z hlediska hodnocení vibrací stroje na zadním ložisku (u budiče) spadají hodnoty vibrací dle normy [25] do kategorie A podle Tabulky 2 (příloha A z normy).

Tab 2) Doporučené hodnoty hranic pásem pro rychlost vibrací ložiskových skříní nebo stojanů pro velké parní turbíny a generátory [25]

Hranice pásem	Otáčky hřídele	
	1/min	
	1 500 nebo 1 800	3 000 nebo 3 600
	Efektivní hodnota rychlosti vibrací na hranicích pásem	
	mm/s	
A/B	2,8	3,8
B/C	5,3	7,5
C/D	8,5	11,8

Pro posouzení vibrací daného stroje za ustálených podmínek a při jmenovitých provozních otáčkách jsou určena následující pásma hodnocení. [25]:

Pásmo A: vibrace nových přejímaných strojů.

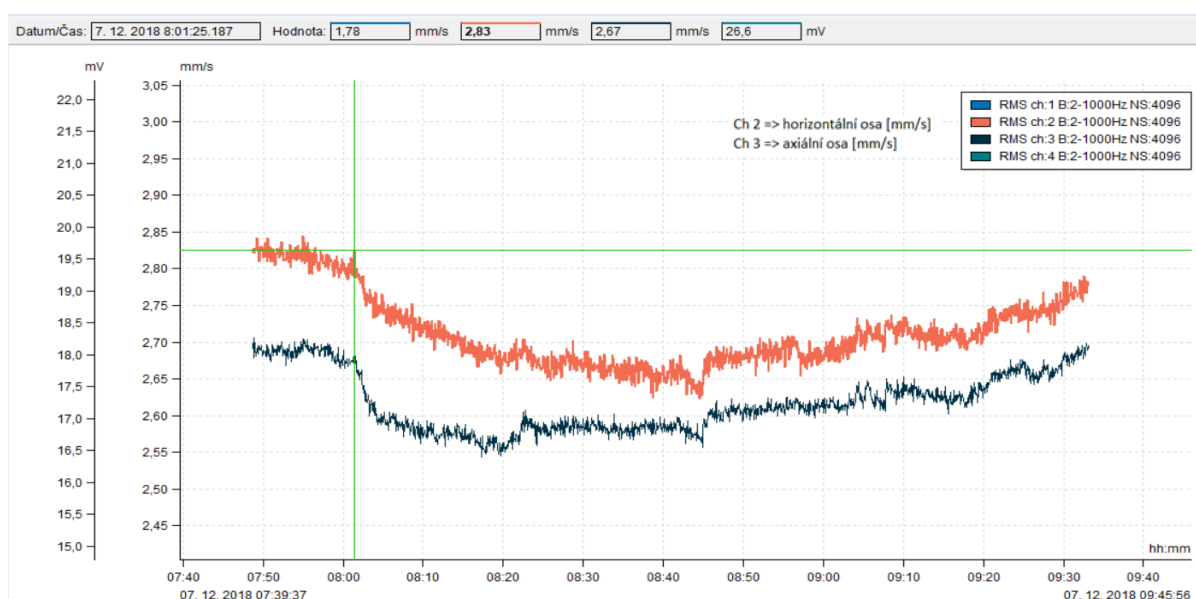
Pásmo B: Stroje jsou považovány za provozu schopné po neomezeně dlouhou dobu.

Pásmo C: Stroje jsou neuspokojivé pro dlouhý trvalý provoz. Všeobecně je možné stroje využívat do doby, než nastane vhodná příležitost k jejich opravě (nápravě).

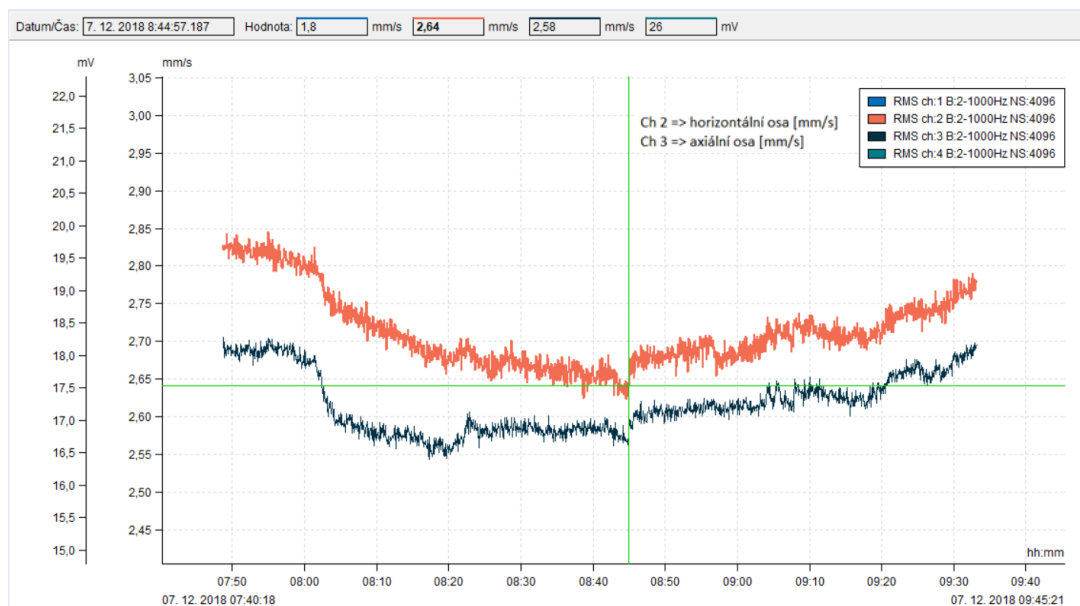
Pásmo D: Hodnoty vibrací už jsou nebezpečné natolik, že mohou způsobit poškození stroje.

6.1.2 RMS – kanálu 2 a 3

Detailnější vzájemné porovnání RMS hodnot vibrací v axiálním a horizontálním směru jsou níže na obrázcích 15,16 a 17.



Obr. 15) Detailnější porovnání RMS kanálu 2 a 3 pro čas 8:01



Obr. 16) Detailnější porovnání RMS pro kanál 2 a 3 pro čas 8:44

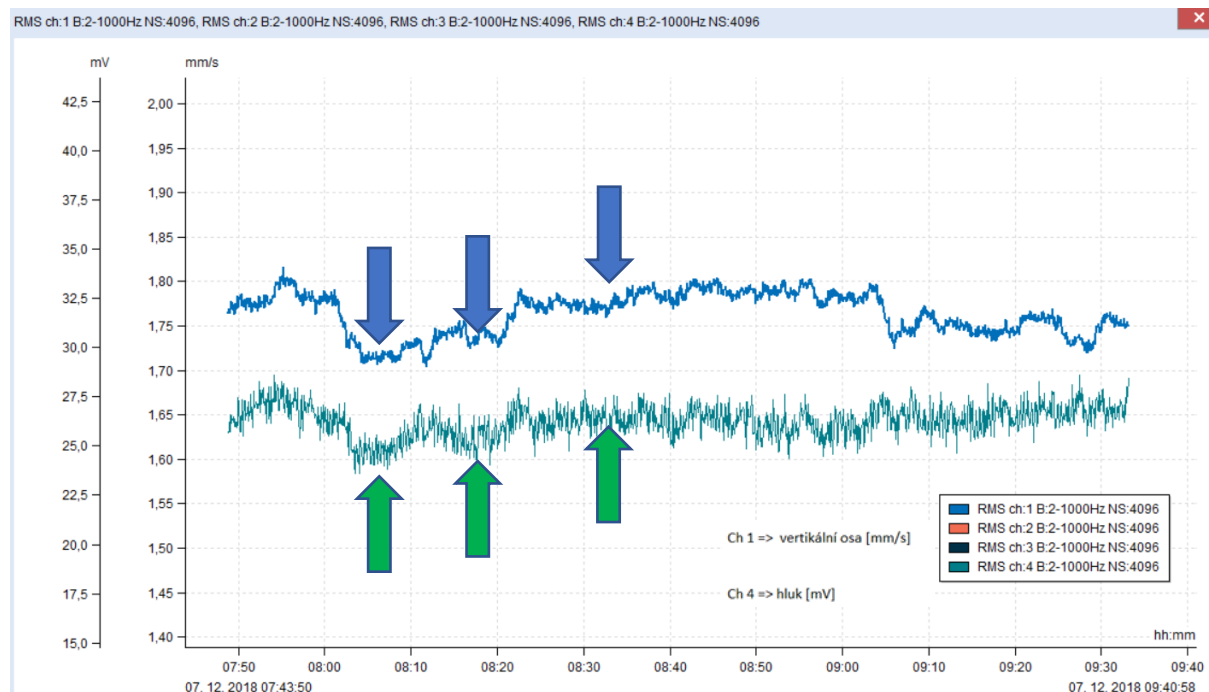


Obr. 17) Detailnější porovnání RMS pro kanál 2 a 3 pro čas 8:22

Dle předchozích 3 vybraných příkladů je patrné, že nejvyšší a nejnižší píky se shodují pro oba směry vibrací. Takových bodů se nachází více po celém průběhu časového záznamu.

6.1.3 RMS – kanálu 1 a 4

Detailnější vzájemné porovnání kanálu 1 a RMS hodnot kanálu 4 hluku, obrázek 18.

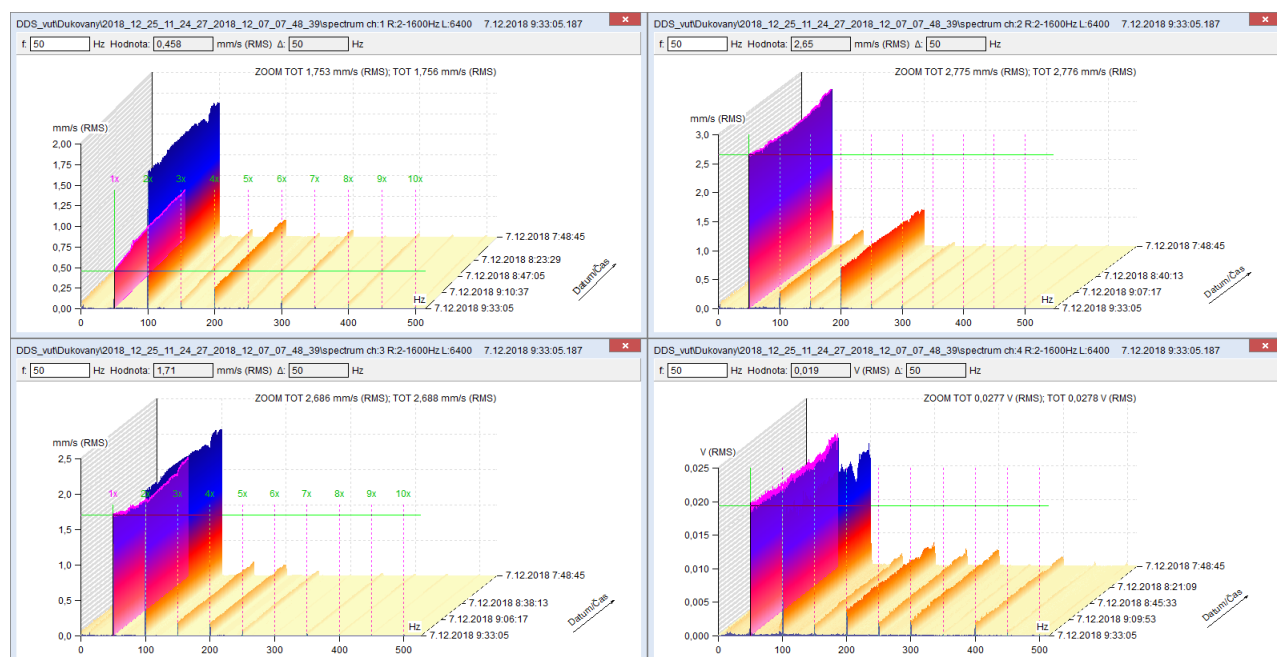


Obr. 18) Porovnání kanálu 1 a 4

Na základě grafického zobrazení můžeme vyslovit hypotézu, že průběh hladiny měřeného hluku je velice podobný průběhu měřených vibrací ve vertikálním směru.

6.1.4 Kaskáda FFT analýzy vibrací a hluku kanálu 1 - 4

Pro další porovnání bylo využito spektrum rychlosti s rozlišením 0-1600 Hz v kaskádovitém typu zobrazení grafu, obrázek 19.



Obr. 19) Kaskádový graf pro všechny čtyři kanály

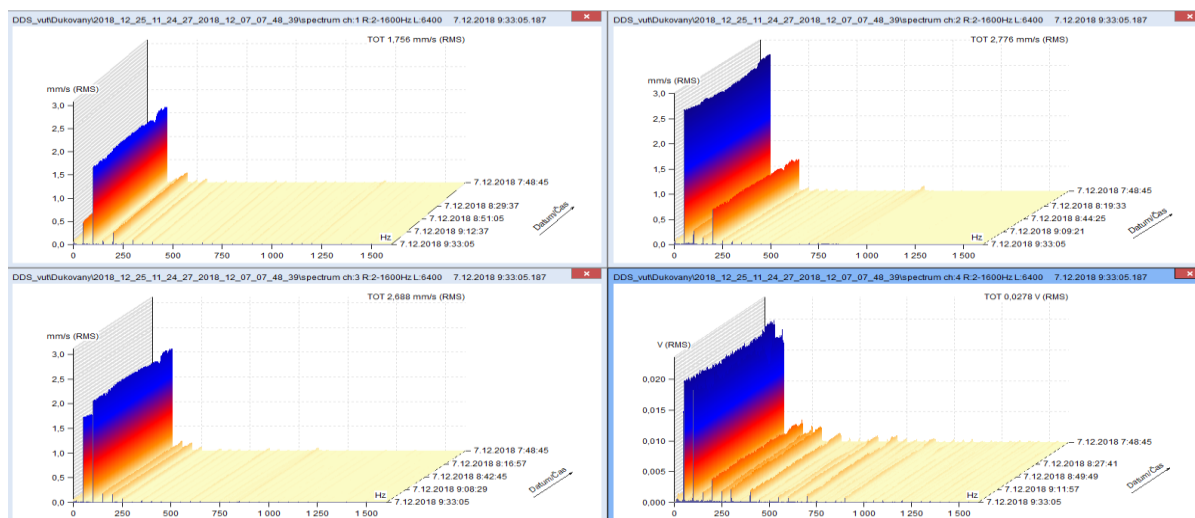
Snímače byly připevněny na zadní straně generátoru (NDE). Porovnáním spekter vibrací je zřejmá otáčková frekvence (50 Hz) soustrojí turbogenerátoru a její harmonické násobky, přičemž ve vertikálním směru je dominantní 2x otáčková frekvence, případně 2x sítová frekvence.

Rozlišení, zda na frekvenci 100 Hz se jedná o 2x harmonickou otáčkovou frekvenci rotoru, nebo o 2x harmonickou frekvenci sítě, je bez doběhu turbosoustrojí nemožné z důvodu, že tyto frekvence jsou shodné u synchronního stroje. Při doběhu turbosoustrojí, případně odpojení od sítě, a vypnutí buzení generátoru by se měla amplituda na frekvenci 100 Hz výrazně snížit, pokud by se jednalo o vliv sítě, případně elektromagnetický vliv na vibrace generátoru. Pokud by se jednalo o mechanický vliv, amplituda vibrací by se výrazně nesnížila.

Porovnání průběhů amplitud hluku a vibrací na jednotlivých frekvencích je vidět velká podobnost právě na frekvenci 100 Hz, což může mít souvislost právě s dvojnásobkem sítové frekvence. Porovnáním předchozích grafů s kaskádovým diagramem je vidět podobnost změny amplitudy vibrací a hluku na 100 Hz. Tato změna se projevuje výrazně v časových počátcích obou zobrazení.

Pro další měření by se dalo doporučit začlenit do systému měření analýzu statorového proudu případně dalších veličin (symetrie proudu, účinnu, výkonů, ...), což je součástí dříve zmíněné dynamické elektrodiagnostiky.

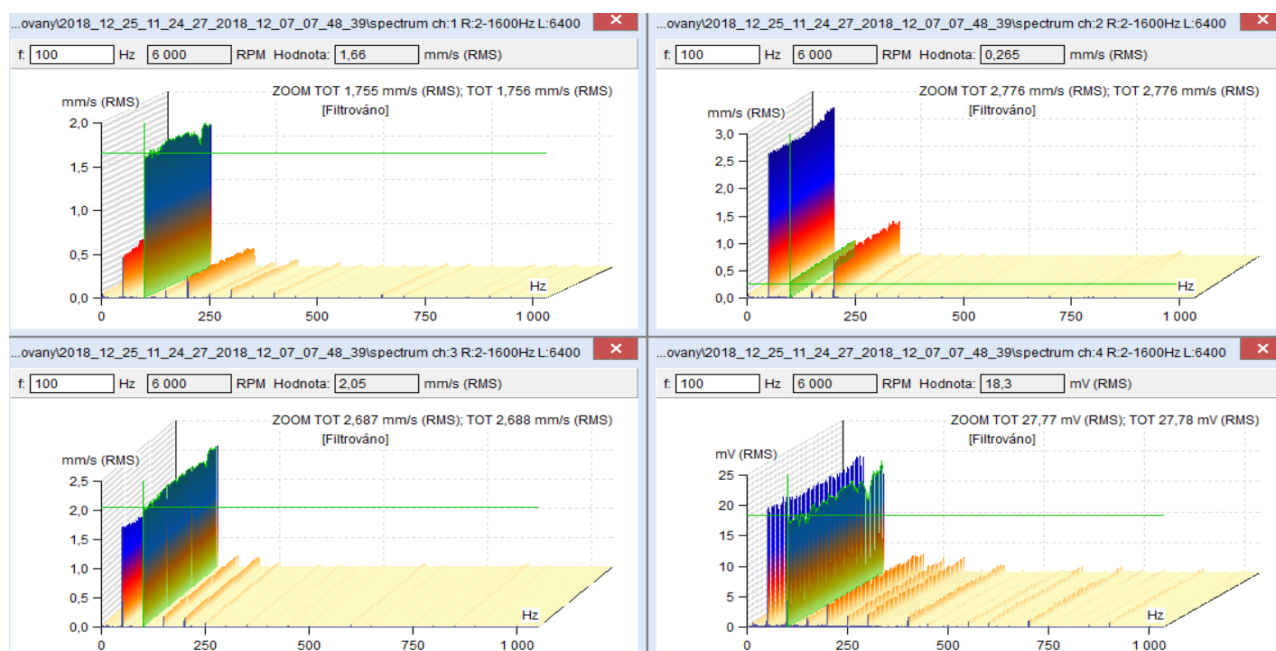
Analýza spektra vibrací na zadní straně generátoru v porovnání s analýzou spektra hluku je, že ve všech spektrech je vidět otáčková frekvence soustrojí turbogenerátoru a její harmonické násobky, což je patrné z následujících obrázků.



Obr. 20) Grafické zobrazení spekter měřených kanálů

Při prozkoumání většího vzorku měření frekvence je vidět, že u vibrací se pohybujeme v rozsahu do 4 až 5 harmonické frekvence. Další frekvence jsou výrazně potlačeny. Naopak u hluku je vidět více harmonických frekvencí.

Jak je patrné z obrázků, největší amplitudy lze sledovat u první či druhé harmonické otáčkové (i sítové) frekvence.

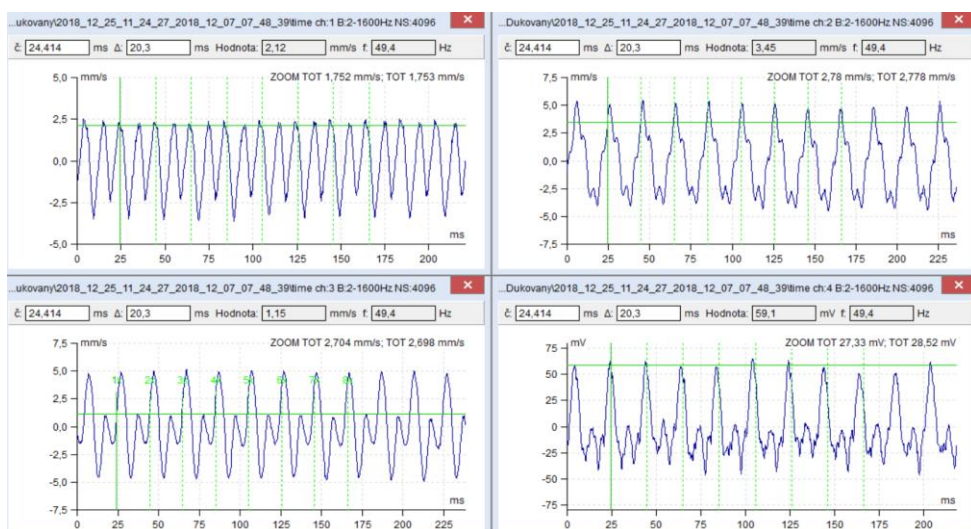


Obr. 21) Kaskáda se zvýrazněním ve 100 Hz

Názornější přehled poskytuje obrázek 21. Největší změny jsou dosaženy v druhé harmonické otáčkové i síťové frekvenci. Tento jev se nejvíce projevuje u průběhu hluku a vibrací ve vertikálním a axiálním směru, může být způsoben vlivem elektromagnetického pole a tím pádem i buzením vlastního generátoru.

6.1.5 Porovnání fází vibrací s hlukem

Následující obrázek 22 je porovnáním fází vibrací s hlukem. Fáze hluku se nejvíce shoduje s fází vertikálního směru vibrací. Naopak tvarem průběhu se nám nejvíce hluk shoduje jak s horizontálním, tak axiálním průběhem vibrací. Horizontální a axiální průběh se dokonce shoduje ve fázích, což znamená, že když je největší hodnota u axiálního průběhu je také i u horizontálního.

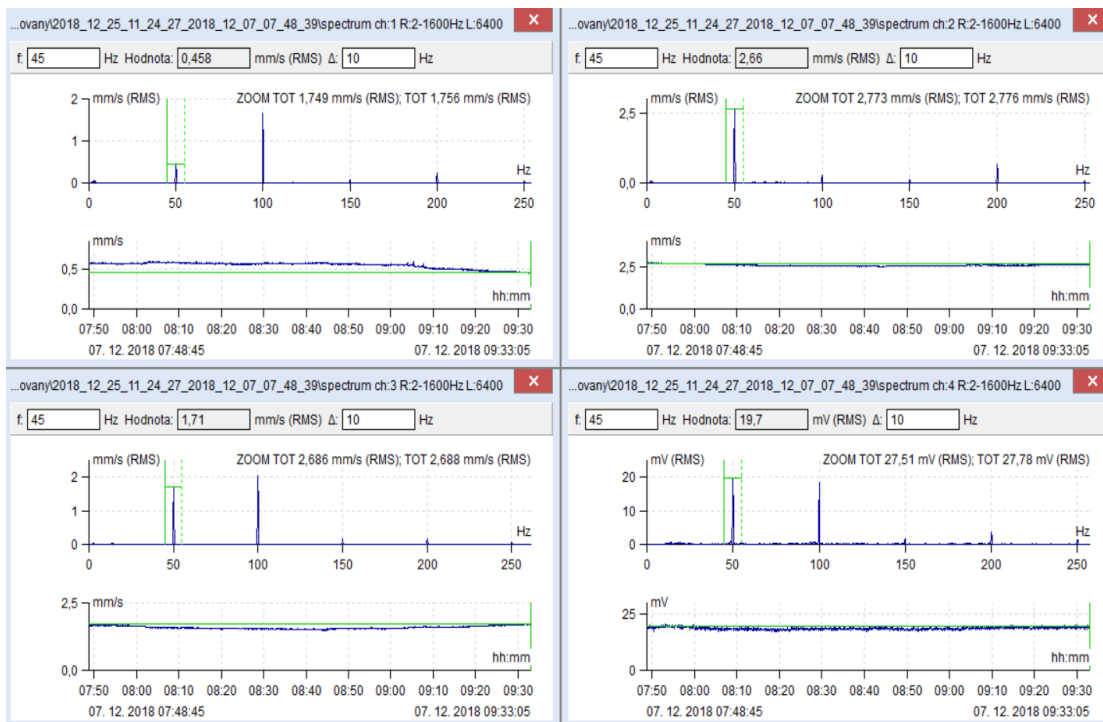


Obr. 22) Grafické znázornění fází pro vibrace a hluk

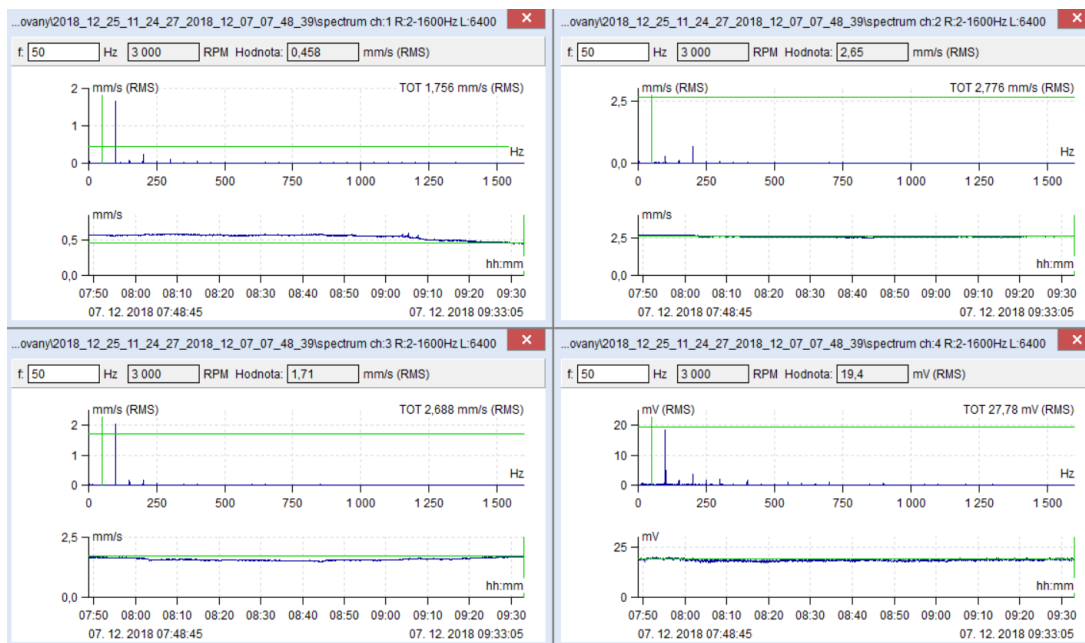
6.1.6 Porovnání trendů na jednotlivých harmonických frekvencích a v pásnu ± 5 Hz

Porovnáním širšího pásma (Delta RMS ± 5 Hz), eliminujeme určité nepřesnosti v rámci spektra a konkrétní sledované frekvence. Při malých změnách amplitudy se může stát průběh nevýrazný, protože trendujeme širší pásmo frekvencí.

Porovnání fází první harmonické frekvence



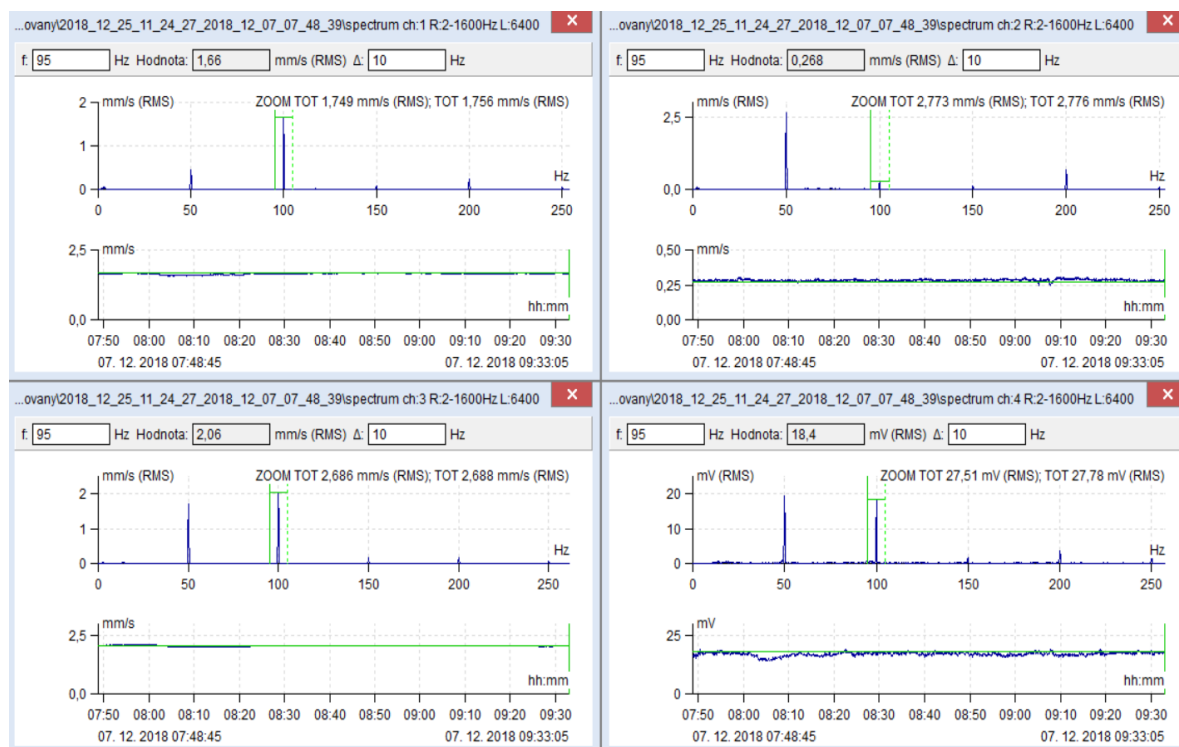
Obr. 23) Porovnání pro 50 Hz \pm 5 Hz



Obr. 24) Porovnání pro 50 Hz

Na hladině 50 Hz a pásma 50 Hz \pm 5 Hz není patrná žádná závislost či shoda s trendy měřených celkových hodnot vibrací a hluku, obrázky 23 a 24.

Porovnání fází druhé harmonické frekvence



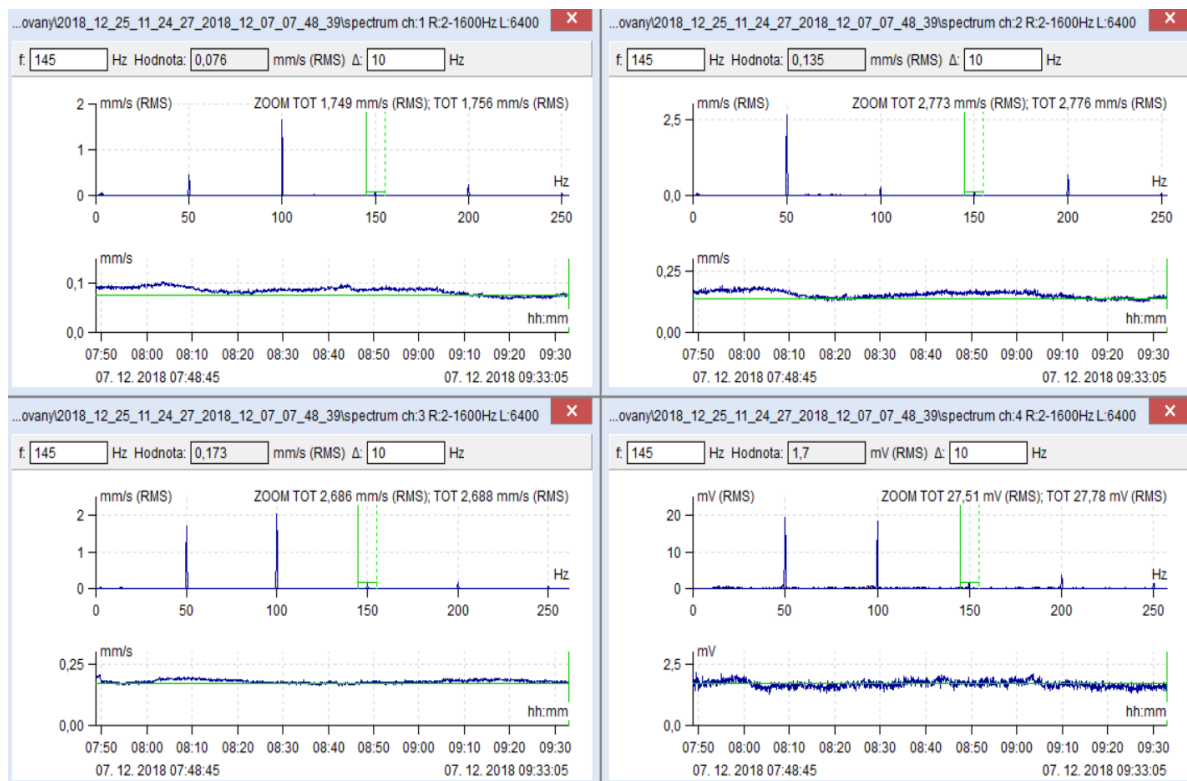
Obr. 25) Porovnání pro 100 Hz \pm 5 Hz



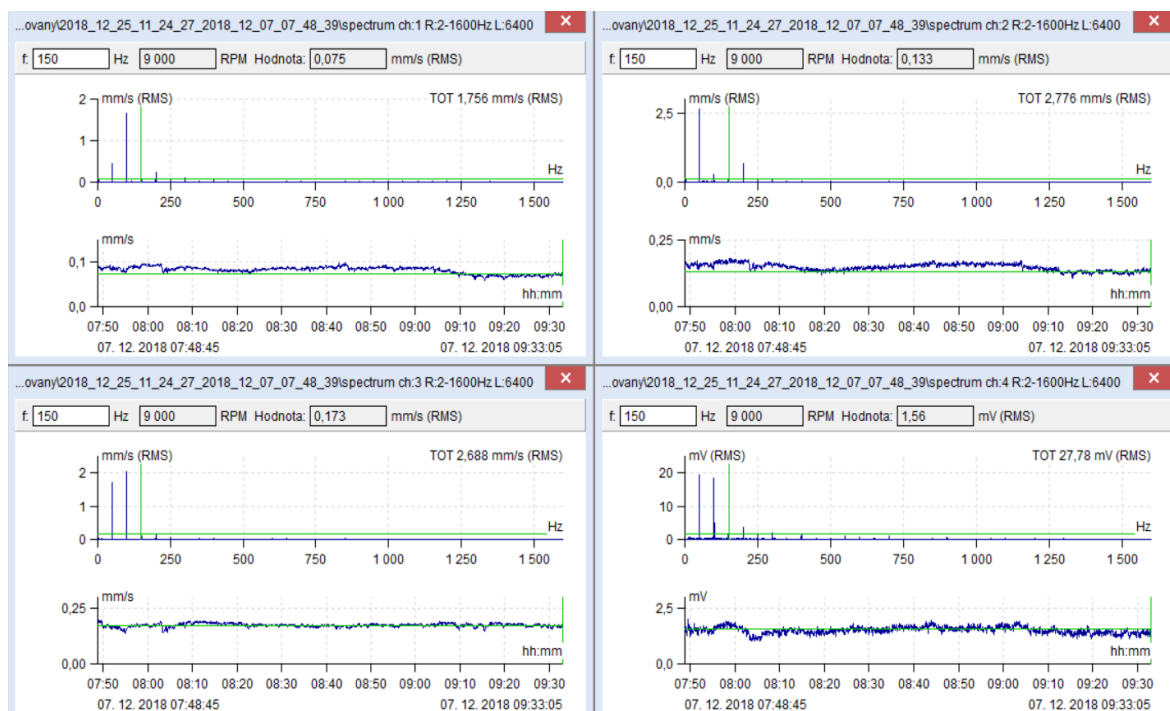
Obr. 26) Porovnání pro 100 Hz

V čase 8:02 je vidět pokles hladiny hluku, který je vidět ve stejném čase i na poklesu vibrační na 100 Hz ve všech kanálech (obrázky 25 a 26).

Porovnání fází třetí harmonické frekvence



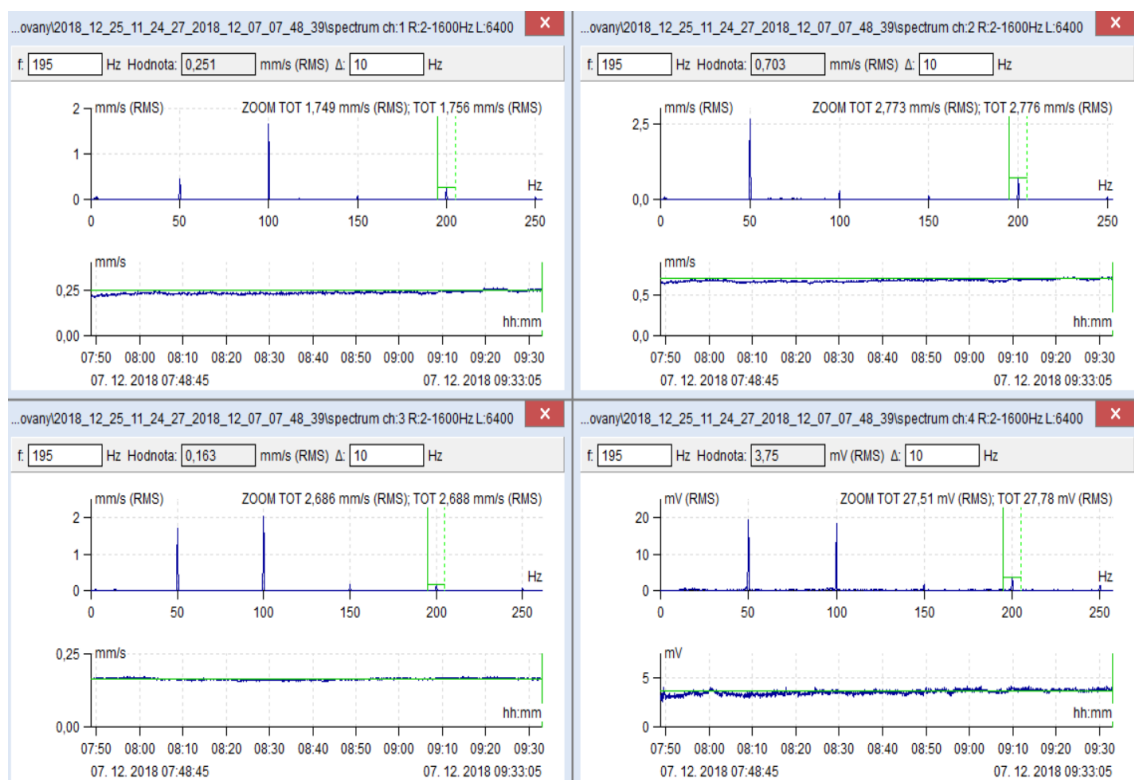
Obr. 27) Porovnání pro 150 Hz \pm 5 Hz



Obr. 28) Porovnání pro 150 Hz

Na obrázcích 27 a 28 je patrná opět závislost hluku na vibracích, která se vyskytla na 3 harmonické (otáčkové a síťové) frekvenci.

Porovnání fází čtvrté harmonické frekvence



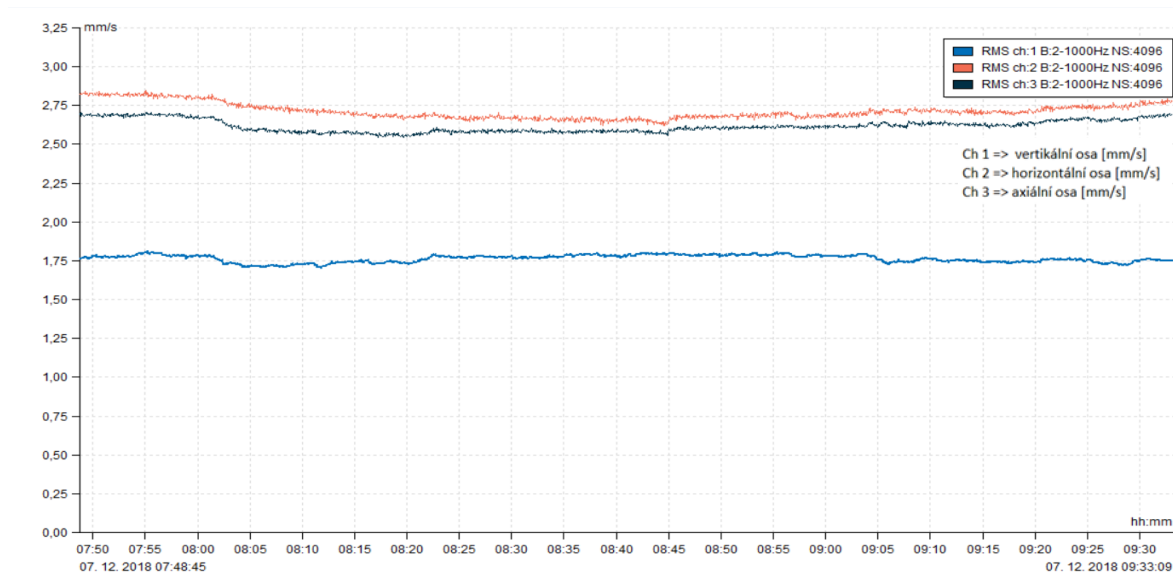
Obr. 29) Porovnání pro 200 Hz \pm 5 Hz



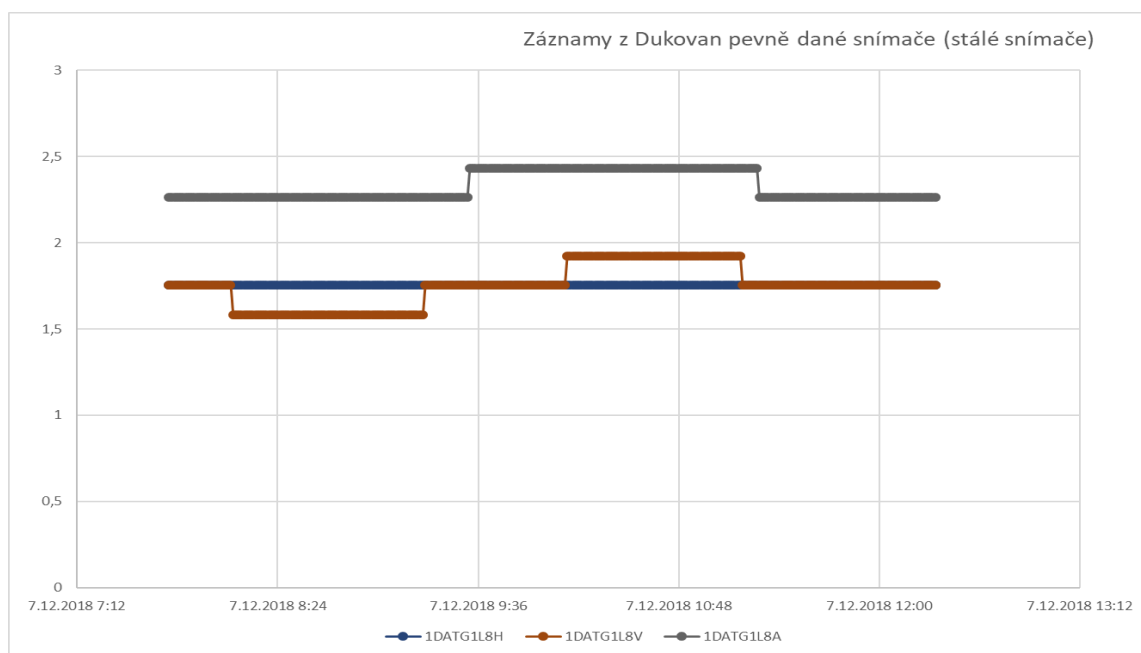
Obr. 30) Porovnání pro 200 Hz

Na obrázcích 29 a 30 ve 4 harmonickém násobku je vidět pokles amplitudy v čase 8:02, který se projevuje jak na vibracích, tak na měřeném hluku napříč všemi kanály.

6.1.7 Porovnání rychlostí vibrací měřených přenosným analyzátelem a vibrací z on-line měření



Obr. 31) Grafické znázornění hodnot z experimentu



Obr. 32) Grafické znázornění hodnot z on-line diagnostiky

Z průběhu rychlosti absolutních vibrací ve vertikálním směru a porovnání vibrací z on-line monitoringu lze pozorovat podobný průběh, jako je tomu při měření vibrací analyzátelem.

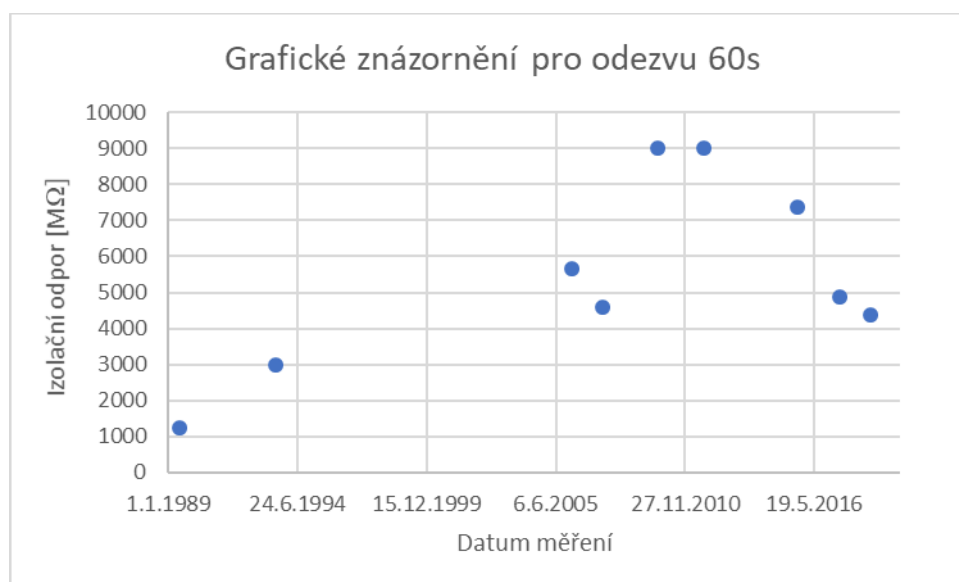
Ostatní směry nelze takto porovnávat z důvodu, že analyzátelem byly tyto vibrace snímány tříosým snímačem, a u on-line systému (obrázek 32) pak jednoosými snímači, které jsou umístěny na jiném místě ložiska generátoru než námi provedené měření. Měření pomocí přenosného analyzátoru ADASH VA4 PRO (obrázek 31) jsou data zaznamenávána průběhem vibrací v kratším časovém intervalu, než je tomu u on-line monitoringu. Z tohoto důvodu je trend z přenosného analyzátoru přesnější než z online monitoringu.

6.2 Vyhodnocení výsledků elektrodiagnostiky

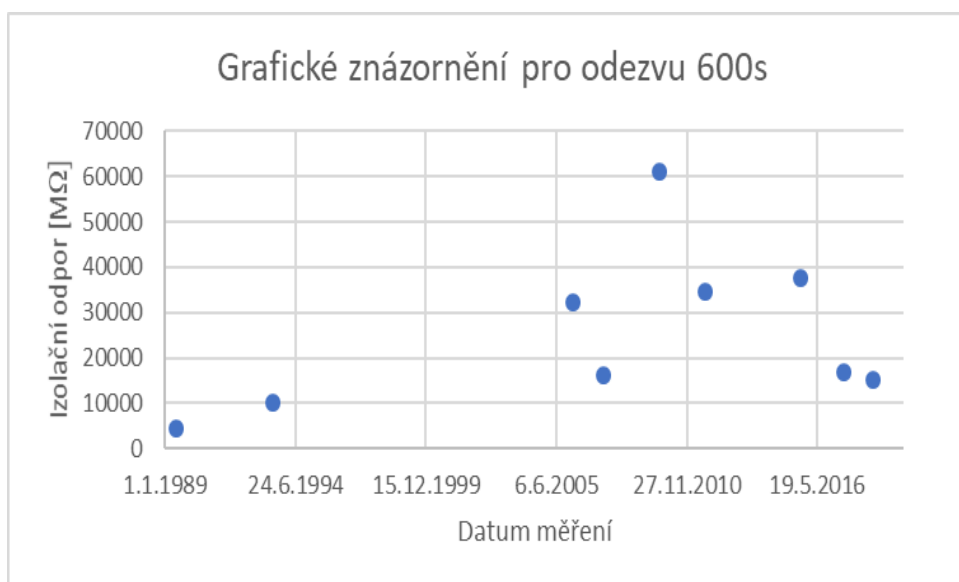
V této kapitole je provedeno vyhodnocení elektrodiagnostiky. Jsou rozebrány diagnostické veličiny, které jsou teoreticky popsány v kap.3.3. Jsou vyhodnoceny pro ukázkou jen některé závislosti, což pro ukázkou a objasnění podstaty věci je dostatečné.

Izolační odpor

Grafické znázornění hodnot R_{iz} pro dobu měření 60 a 600 s, jsou na obrázku 33 a 34.



Obr. 33) Grafické znázornění pro odezvu 60 s



Obr. 34) Grafické znázornění pro odezvu 600 s

Je patrné, že jsou velké rozdíly v počátečních obdobích měření tzn. přibližně do roku 2006. Tedy jedná se o dobu přibližně 17 let. Na základě poznatků z technické praxe na tyto rozdíly můžou mít vliv nedodržení podmínek při měření např. teplota měření a podobně. Počáteční období provozu generátoru je také spojeno s procesy v materiálech izolačního vinutí např. dochází k do vytvrzování epoxidové pryskyřice to má vliv na to, že se izolační odpor zvyšuje. Objevuje se

nedodržování pravidelných intervalů měření. Zhruba od roku 2006 se dbá na dodržování podmínek při měření. Je patrné z grafu, že izolační odpor má klesající tendenci, tzn. že se projevuje stárnutí izolačního systému generátoru.

Polarizační index (P_i)

Pro změřený izolační odpor byl vypočítán pro každé měření (datum) a fázi (U,V,W) polarizační index dle teorie z kap.3.3. Jako příklad je v tabulce X uveden desetiminutový polarizační index (P_i [600]) pro fázi W.

Tabulka 3. Příklad výpočtu desetiminutového polarizačního indexu

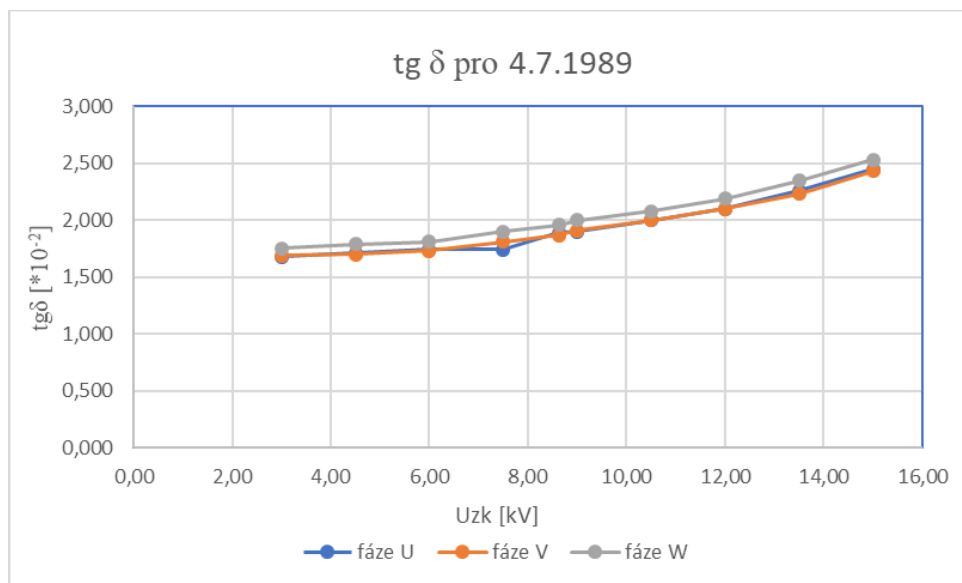
Tab 3) Tabulka polarizačního indexu

Datum měření	P_i [600] Fáze W
04.07.1989	2,32
20.07.1993	2,86
10.02.2006	1,48
21.05.2007	4,79
29.09.2009	6,78
06.09.2011	4,05
04.09.2015	4,28
21.06.2017	4,35
25.09.2018	2,89

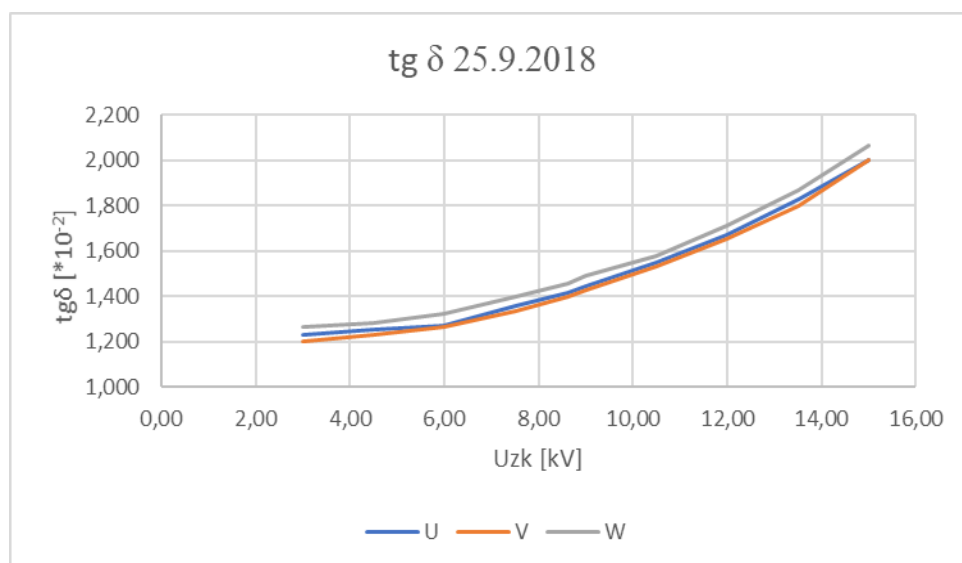
Polarizační index se pohybuje v uvedeném případě v rozmezí od 2,32 do 12,5, což je v souladu s doporučeními v normě [26].

Podobné lze konstatovat i v ostatních případech.

Ztrátový činitel ($\text{tg } \delta$)



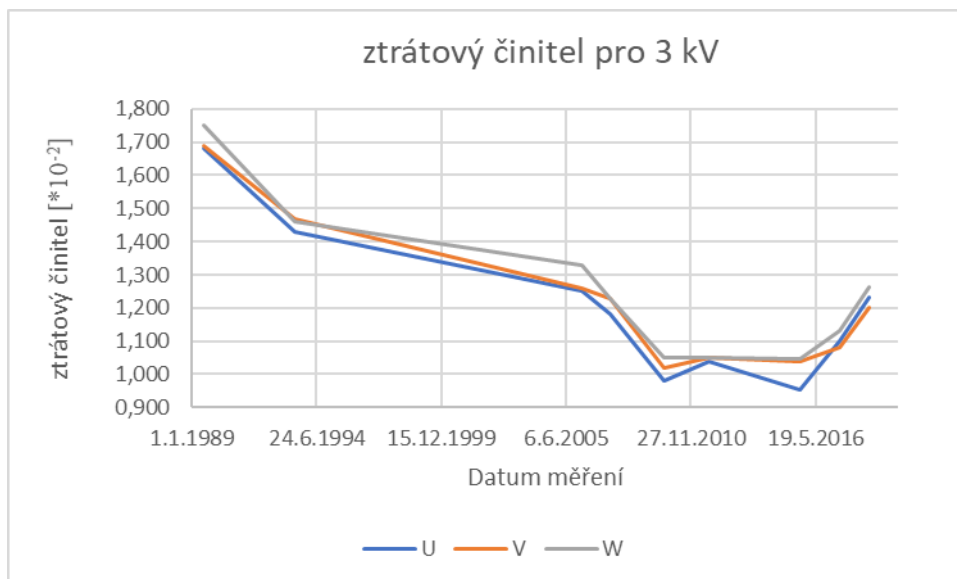
Obr. 35) Grafické znázornění závislosti $\text{tg } \delta$ na napětí pro uvedený den a rok 1989



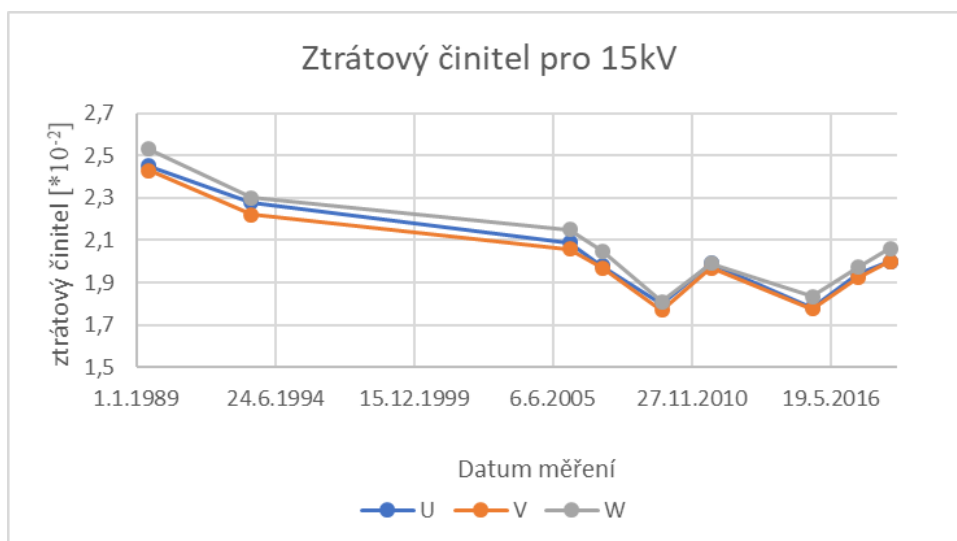
Obr. 36) Grafické znázornění závislosti $\text{tg } \delta$ na napětí pro uvedený den a rok 2018

Z obrázku 35 je patrné, že průběh počátečních hodnot odpovídá teoretickým předpokladům. Zhruba od hodnoty napětí 7kV má vzrůstající tendenci což můžou mít za následek částečné výboje vznikající v nehomogenitách materiálu izolace vinutí. Pro přesnější rozbor by bylo žádoucí mít k dispozici měření úrovně částečných výbojů a výsledky porovnat. Výsledky jsou více zřetelné z obrázku 36. Jsou vyhodnoceny jen některé případy, pro uvedený den a rok. Pro ostatní případy jsou průběhy podobné a i vyhodnocení je přibližně totožné.

V dalším jsou znázorněny průběhy ztrátového činitele pro určité zvolené napětí (uvedeno v legendě k obrázku) na čase.



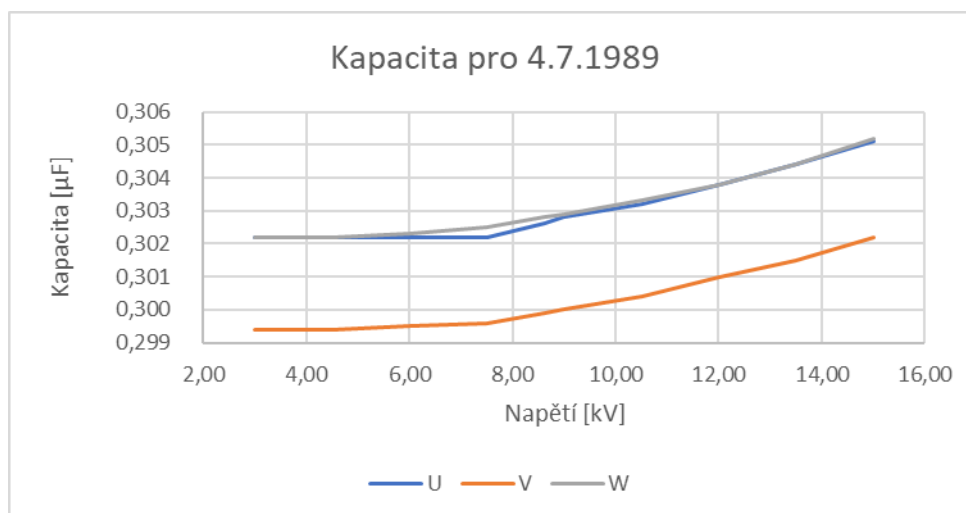
Obr. 37) Grafické znázornění závislosti ztrátového činitele na čase pro napětí 3kV



Obr. 38) Grafické znázornění závislosti ztrátového činitele na čase pro napětí 15kV

Z obrázků je patrné, že hodnota ztrátového činitele se v závislosti na čase zmenšuje, v posledních časových obdobích jsou v měření poněkud větší výkyvy. Tyto mohou být vysvětleny různým způsobem, např. stárnutím izolace vinutí generátoru, nepřesností měření či v dokumentaci neuvedeným vnějším zásahem např. v rámci údržby generátoru.

Kapacita (C)

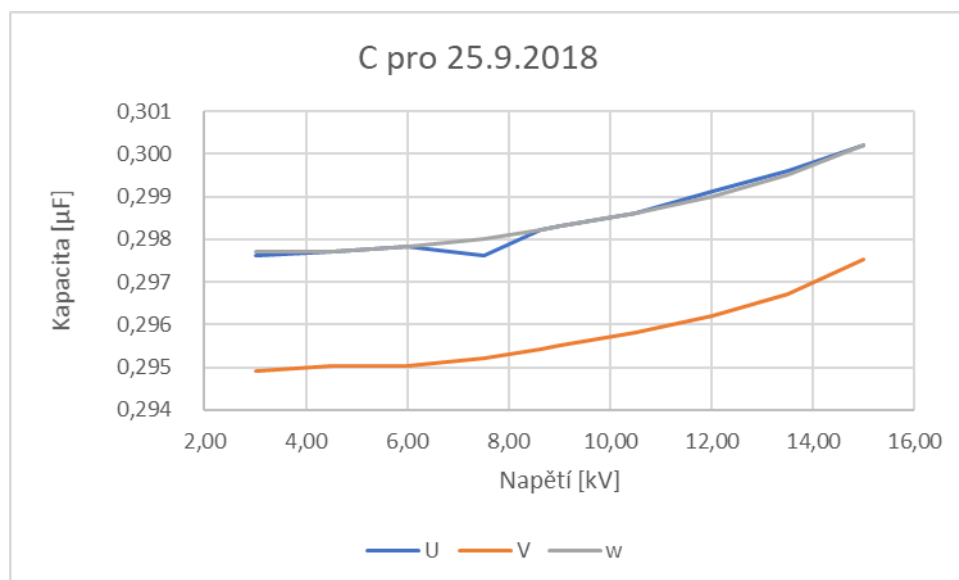


Obr. 39) Grafické znázornění závislosti kapacity na napětí pro uvedený den a rok 1989

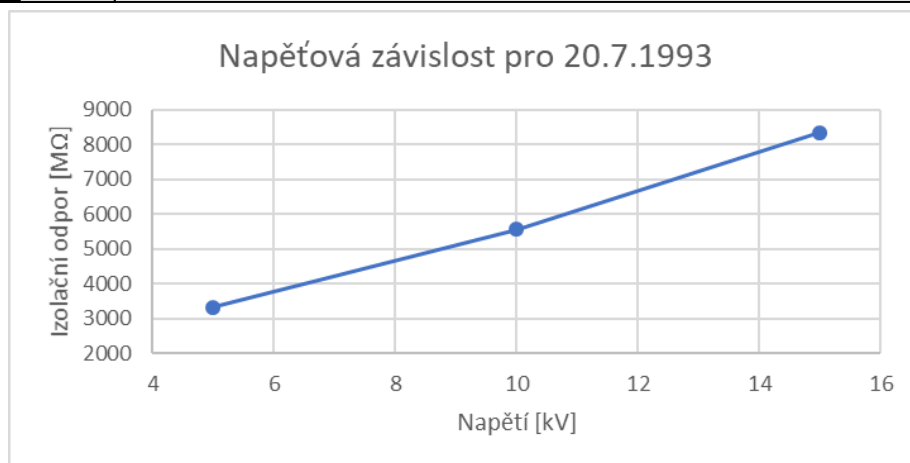
Podobné závěry lze učinit i na základě měření kapacity. Průběhy ve srovnání se ztrátovým činitelem jsou podobné, rovněž i závěry.

Další veličiny

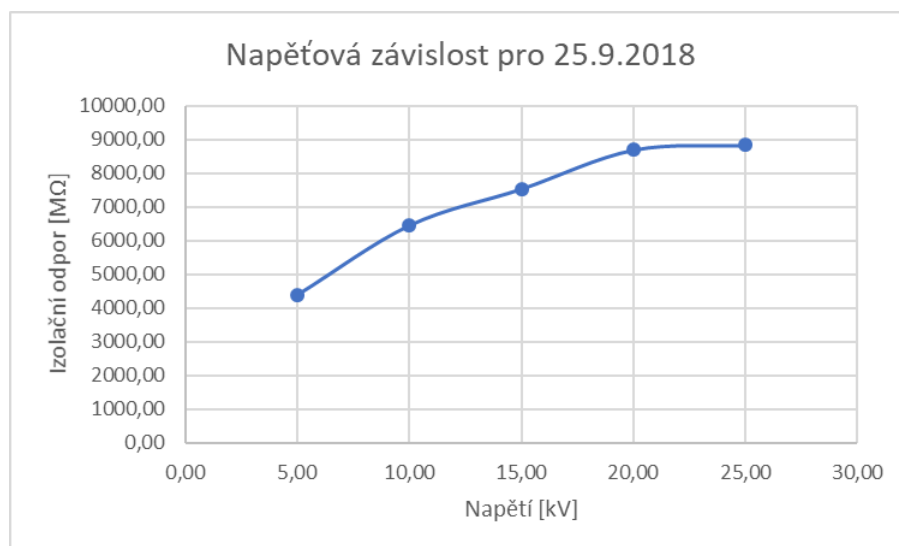
Další zkoumanou závislostí je měření *izolačního odporu v závislosti na přiloženém napětí*, které se zvyšuje v rozsahu od 5 do 25 kV. Jsou vyhodnoceny jen některé případy, pro uvedený den a rok. Pro ostatní případy jsou průběhy podobné a i vyhodnocení je přibližně totožné. Tyto závislosti jsou uvedeny na obrázcích 40, 41 a 42.



Obr. 40) Grafické znázornění závislosti kapacity na napětí pro uvedený den a rok 2018



Obr. 41) Grafické znázornění závislosti izolačního odporu na napětí pro uvedený den a rok 1993



Obr. 42) Grafické znázornění závislosti izolačního odporu na napětí pro uvedený den a rok 2018

Další zkoumanou závislostí je měření izolačního odporu v závislosti na přiloženém napětí, které se zvyšuje v rozsahu od 5 do 25 kV. Jsou vyhodnoceny jen některé případy, pro uvedený den a rok. Pro ostatní případy jsou průběhy podobné a i vyhodnocení je přibližně totožné. Jak je vidět z grafických závislostí, ze začátku doby života generátoru se odpor zvyšuje lineárně v závislosti na napětí. V pozdějších dobách života tato závislost není lineární. I tento fakt popisuje stárnutí izolačního systému generátoru. V tomto případě je izolační odpor úměrný vodivostní složce proudu a při větších dobách života izolace se zvyšuje podíl nízkomolekulárních složek v izolaci a zvětšuje se vodivostní proud, čímž izolační odpor klesá.

7 VLASTNÍ ZÁVĚRY

V rámci diplomové práce byl proveden rozbor současného stavu řešené problematiky v rámci JE Dukovany se zaměřením na vibrodiagnostiku, elektrodiagnostiku a hlukovou diagnostiku. Byl proveden systémový rozbor řešené problematiky a byl navržen způsob řešení zadaného úkolu.

Byl realizován experiment a rozebrány jeho výsledky, které byly vyhodnoceny výše. Zatím dílčí výsledky naznačují, že je možné sledovat shodu v některých případech u některých diagnostických veličin a metod.

Na základě výše uvedeného jsou dále formulovány vlastní závěry, obecné a konkrétní dílčí.

Na základě provedeného experimentu generátoru TG11 je třeba se zaměřit na systémový přístup v realizaci multiparametrické diagnostiky v elektrárně.

Je třeba sjednotit intervaly pro sběr a následné vyhodnocování dat. Je třeba důsledně vycházet z provedené multiparametrické diagnostiky, z jejich výsledků a toto promítnout do plánování vlastní diagnostiky a především údržby zařízení (i generální opravy).

Vše výše uvedené zahrnout do metod a metodik používaných v diagnostice v rámci JE Dukovany (vibrodiagnostika, elektrodiagnostika, hluková diagnostika).

Dále lze také realizovat dílčí následující doporučení:

1. Je třeba podrobněji vyhodnotit výsledky i dalších experimentů z hlediska shody diagnostických veličin v rámci vibrodiagnostiky, elektrodiagnostiky a diagnostiky hlukové. Totéž realizovat i v závislosti na jiných veličinách, např. výkonu činného nebo jalového.
2. Pro rozlišení, zda se jedná o mechanický či elektrický problém u generátoru, lze doporučit provést analýzu měření vibrací a hluku při odstavování generátoru tak, abychom toto měření prováděli při snížení buzení generátoru a dále pak při doběhu generátoru. Tímto způsobem bychom pak mohli lépe diagnostikovat příčinu problému.
3. Více analyzovat získaná data z hlediska fyzikálního obsahu. Nevycházet jen z kritických hodnot, z norem, či jiných doporučení např. z inspekčního orgánu ČEZ a.s.
4. Ztrátový činitel vyhodnocovat v souvislosti s kapacitou, nejen brát hodnotu tohoto činitele z jednoho měření.
5. Nevycházet při měření ztrátového činitele jen z jeho hodnot, ale brát v úvahu i přesnost měření.
6. Dodržovat podmínky měření dle norem a dalších postupů (teplota, metodické postupy a jiné).
7. V práci nejsou vyhodnocovány elektrické výboje. I přes toto lze doporučit také vyšetření podstaty výbojů (výboj na povrchu, korona, plazivý výboj apod.)
8. V souvislosti s výpočtem polarizačního indexu se snažit vysvětlit fyzikální podstatu dějů probíhajících v izolaci.
9. Lze doporučit podrobnější vyhodnocení všech získaných dat (i bod 1. výše).
10. Měření hluku a jeho výsledky považovat za upozornění, že se ve stroji něco děje, skutečnosti sledovat ve vibrodiagnostice, případně elektrodiagnostice (i dynamické).

V rámci předložené diplomové práce byly výše formulovány obecné a i dílčí závěry a doporučení. Jedná se jen o závěry vyplývající z řešení diplomové práce na základě získaných zkušeností diplomantky a konzultací s pracovníky firmy a diagnostiky, kteří se podobnými problémy zabývají. Pro erudovanější závěry je třeba aplikovat navrhovaný důsledný systémový přístup k řešení uvedené problematiky.

8 ZÁVĚR

V předkládané diplomové práci byla pozornost soustředěna na závažný technický a ekonomický problém, a to obecně na příspěvek v rámci zvyšování kvality při výrobě elektrické energie v generátoru v jaderné elektrárně. Konkrétně se jednalo o JE Dukovany a jeden vybraný generátor. Diplomová práce se týkala zvyšování spolehlivosti, a to se zaměřením na technickou diagnostiku. Tato se v poslední době značně rozvíjí, i v souvislosti s rozvojem iniciativy Průmysl 4.0. V rámci technické diagnostiky se v energetice používají přístupy off-line diagnostiky, ale také novější přístupy diagnostiky on-line. Zvláště v několika posledních letech se do popředí rozvoje technické diagnostiky dostává multiparametrická diagnostika. V rámci této diagnostiky se právě v energetice řeší využití závěrů z vibrodiagnostiky, hlukové diagnostiky a elektrodiagnostiky. Zatím však je vše uvedené v začátcích, nejsou známy systémové relevantní závěry, které by dávaly jednoznačnou odpověď na nasazení právě multiparametrické diagnostiky k posuzování stavu generátorů v elektrárnách. Proto byl zvolen při řešení diplomové práce systémový přístup, který by měl přispět k řešení daného tématu.

Výsledky diplomové práce jsou příspěvkem k využití multiparametrické diagnostiky k posouzení stavu generátorů v elektrárnách. Vzhledem k současnému stavu problému byla k řešení diplomové práce použita data, která byla získána většinou odděleným měřením z hlediska vibrodiagnostiky, hlukové diagnostiky a elektrodiagnostiky. V případě vibrodiagnostiky a hlukové diagnostiky byl připraven a realizován experiment, a to s důrazem na možnost porovnání výsledků mezi oběma diagnostickými metodami. Lze konstatovat, že zatím jen dílčí závěry ukazují, že existuje za určitých podmínek nějaká souvislost mezi získanými výsledky. To je jeden z několika reálných závěrů, které předložená diplomová práce přinesla. Ostatní v práci uvedené výsledky ukazují na možnost reálného použití všech popsanych a částečně vyhodnocených metod v rámci multiparametrické diagnostiky.

V diplomové práci byl dle zadání popsán současný stav řešené problematiky se zaměřením na hlukovou diagnostiku, vibrodiagnostiku a elektrodiagnostiku. Bylo přínosem, že ke všemu tomuto uvedenému bylo využito teoretických i praktických znalostí, které jsou vyučovány v rámci výuky ve studovaném oboru. V rámci diplomové práce byl proveden systémový rozbor řešené problematiky, byl naplánován a realizován experiment, který byl také vyhodnocen a byly formulovány vlastní závěry. Vše výše naznačené vycházelo ze stavu řešení problému, rovněž i praktická realizace byla limitována stavem řešení problému a skutečností, že se jedná o elektrárnu jadernou, kde jsou zpřísněné předpisy z hlediska technického i bezpečnostního. I přes výše naznačené lze konstatovat, že zadané cíle práce byly splněny.

Závěrem je nutné zdůraznit, že systémové řešení využití multiparametrické diagnostiky k posouzení stavu generátorů v elektrárně je teprve v počátcích. Lze však doufat, že získané i dílčí výsledky v diplomové práci přispějí k rozvoji řešené problematiky.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČERNOHORSKÝ, Jiří. Technická diagnostika [online]. 2006, 17.07.2006 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technicka-diagnostika.html>
- [2] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. Praha: BEN – technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin, díl 4. ISBN 80-7300-158-6.
- [3] VOŠTOVÁ, Věra, František HELEBRANT, Karel JEŘÁBEK a kol. Provoz a údržba strojů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2531-4.
- [4] MYKISKA, Antonín, František HELEBRANT, Karel JEŘÁBEK a kol. Bezpečnost a spolehlivost technických systémů. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2868-2.
- [5] KEMÉNY, Tamás, Jiří ZIEGLER, Karel JEŘÁBEK a kol. Technical diagnostics: collected papers. Vyd. 2. přeprac. Commack, N.Y.: Nova Science Publishers, 1988. IMEKO TC series, no. 20. ISBN 978-0941743419.
- [6] ZIEGLER, Jiří, Karel JEŘÁBEK a kol., CZICHOS, Horst, ed. Handbook of technical diagnostics: fundamentals and application to structures and systems. Vyd. 2. přeprac. Heidelberg: Springer, c2013. IMEKO TC series, no. 20. ISBN 978-3-642-25849-7.
- [7] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: Část Vibrační diagnostika: studijní opora. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [8] HAMMER, Miloš. 5. Technická diagnostika [přednáška]. Brno: FSI VUT, 20.4.2018
- [9] ČSN EN 61063. Akustika – měření hluku šířeného vzduchem, vyzařovaného parními stroji i turbínami a jimi poháněnými stroji. 1998.
- [10] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-010-1306-5.
- [11] HAMMER, Miloš. 5. Diagnostický signál a jeho základní vlastnosti [přednáška]. Brno: FSI VUT, 17.4.2018.
- [12] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [13] KREIDL, Marcel, Josef KOZÁK, Oldřich TARABA a kol. Diagnostické systémy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2349-4.
- [14] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER, Karel JEŘÁBEK a kol. Technická diagnostika a spolehlivost. Vyd. 2. přeprac. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [15] PAČAIOVÁ, Hana. Riadenie údržby, ako nástroj na zvyšovanie pohotovosti a bezpečnosti prevádzky. AT&P Journal. 2009, 16(1). ISSN 1335-2237.
- [16] PAČAIOVÁ, Hana. Riadenie údržby II. Efektivnosť a bezpečnosť v údržbe. 1. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2011. ISBN 987-80-553-0856-2.
- [17] PETKOVÁ, Viera. Teória a aplikácia vybraných metód technickej diagnostiky, Nitra: Technická univerzita v Košiciach, ISBN 9788055304830
- [18] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. Technická diagnostika a spolehlivost. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-883-6
- [19] ČSN ISO 5348. Vibrace a rázy – Mechanické připevnění akcelerometrů. 1999.

- [20] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [21] HAMMER, Miloš. Metody umělé inteligence v diagnostice elektrických strojů. Praha: BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-231-2.
- [22] DUFFUAA, Salih O., Jiří ZIEGLER, Karel JEŘÁBEK a kol. Planning and control of maintenance systems: modelling and analysis. Second edition. Cham: Springer, 2015. IMEKO TC series, no. 20. ISBN 978-331-9371-818.
- [23] LEGÁT, Václav, Jiří ZIEGLER, Karel JEŘÁBEK a kol. Management a inženýrství údržby: modelling and analysis. Druhé doplněné vydání. Praha: Kamil Mařík – Professional Publishing, 2016. IMEKO TC series, no. 20. ISBN 978-80-7431-163-5.
- [24] PAČAIOVÁ, Hana. Základné trendy v riadení údržby a problémy pri ich zavádzaní. 1. Spravodaj ATD SR, 2007. ISBN 978-80-8073-866-2.
- [25] ČSN ISO 20816-2. Vibrace – Měření a hodnocení vibrací strojů: Část 2: Plynové turbíny, parní turbíny a generátory nad 40 MW s kluznými ložisky, na pozemních základech a jmenovitými otáčkami 1 500 r/min, 1 800 r/min, 3 000 r/min a 3 600 r/min. 2018. ČSN ISO 20816-2 (011412).
- [26] ČSN EN IEC 60034–27–4. Točivé elektrické stroje: Měření izolačního odporu a polarizačního indexu izolace vinutí točivých elektrických strojů. 2018.

10 SEZNAM TABULEK, OBRÁZKŮ A ZKRATEK

10.1 Seznam tabulek

Tab 1)	Technické parametry generátoru TG11	35
Tab 2)	Doporučené hodnoty hranic pásem pro rychlost vibrací ložiskových skříní nebo stojanů pro velké parní turbíny a generátory [26].....	38
Tab 3)	Tabulka polarizačního indexu	49

10.2 Seznam obrázků

Obr. 1)	Schéma rozdělení technické diagnostiky	18
Obr. 2)	Příklady hladin akustického výkonu [9].....	20
Obr. 3)	Schéma rozmístění mikrofónů.....	21
Obr. 4)	Schéma vibrací [11]	23
Obr. 5)	Akcelerometry: a) tlakový b) smykový c) skutečné provedení.....	24
Obr. 6)	Schéma umístění snímačů měření [11]	24
Obr. 7)	Ukázka os měření vibrací [11]	25
Obr. 8)	Typický přenosný monitorovací systém [12].....	26
Obr. 9)	Frekvenční spektrum [12]	27
Obr. 10)	Možná varianta algoritmu pro monitorovací program vibrací [12]	28
Obr. 11)	Příklad obálkového spektra vnějšího kroužku valivého ložiska	29
Obr. 12)	Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí [20]	30
Obr. 13)	Schéma Scheringova můstku [20]	31
Obr. 14)	RMS průběhy hluku a vibrací.....	37
Obr. 15)	Detailnější porovnání RMS kanálu 2 a 3 pro čas 8:01	38
Obr. 16)	Detailnější porovnání RMS pro kanál 2 a 3 pro čas 8:44	39
Obr. 17)	Detailnější porovnání RMS pro kanál 2 a 3 pro čas 8:22	39
Obr. 18)	Porovnání kanálu 1 a 4.....	40
Obr. 19)	Kaskádový graf pro všechny čtyři kanály	40
Obr. 20)	Grafické zobrazení spekter měřených kanálů	41
Obr. 21)	Kaskáda se zvýrazněním ve 100 Hz	42
Obr. 22)	Grafické znázornění fází pro vibrace a hluk.....	42
Obr. 23)	Porovnání pro 50 Hz \pm 5 Hz	43
Obr. 24)	Porovnání pro 50 Hz.....	43
Obr. 25)	Porovnání pro 100 Hz \pm 5 Hz	44
Obr. 26)	Porovnání pro 100 Hz.....	44

Obr. 28) Porovnání pro 150 Hz	45
Obr. 29) Porovnání pro 200 Hz \pm 5 Hz	46
Obr. 30) Porovnání pro 200 Hz	46
Obr. 31) Grafické znázornění hodnot z experimentu.....	47
Obr. 32) Grafické znázornění hodnot z on-line diagnostiky.....	47
Obr. 33) Grafické znázornění pro odezvu 60 s	48
Obr. 34) Grafické znázornění pro odezvu 600 s	48
Obr. 35) Grafické znázornění závislosti tg δ na napětí pro uvedený den a rok 1989.....	50
Obr. 36) Grafické znázornění závislosti tg δ na napětí pro uvedený den a rok 2018.....	50
Obr. 37) Grafické znázornění závislosti ztrátového činitele na čase pro napětí 3kV.....	51
Obr. 38) Grafické znázornění závislosti ztrátového činitele na čase pro napětí 15kV.....	51
Obr. 39) Grafické znázornění závislosti kapacity na napětí pro uvedený den a rok 1989.....	52
Obr. 40) Grafické znázornění závislosti kapacity na napětí pro uvedený den a rok 2018.....	52
Obr. 41) Grafické znázornění závislosti izolačního odporu na napětí pro uvedený den a rok 1993	53
Obr. 42) Grafické znázornění závislosti izolačního odporu na napětí pro uvedený den a rok 2018	53

10.3 Seznam zkratk

FFTje zkratka pro Frekvenční analýzu pomocí Fourierovi transformace

RMS Root mean square – efektivní hodnota veličin

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 : Protokol měření

PŘÍLOHA 1



Zkušební laboratoř č. 1047 akreditovaná ČIA
podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005

Protokol o zkoušce

č.: VYZ-1856Z-0006-01A

Zákazník: ČEZ, a.s.
Duhová 2/1444
140 53 Praha 4

Předmět zkoušení: Diagnostické měření hluku generátoru
turbosoustrojí TG11 (1SP10) v elektrárně
Dukovany

Datum přijetí zkoušky: 15. 2. 2018
Datum provedení zkoušky: 3. 5. 2018
Identifikační číslo zakázky: 1856E0006
Zkoušku vykonal: Ing. Petr Budek

Objednávka číslo:
Zakázkové / běžné číslo:
Místo provedení zkoušky: Strojovna 1. bloku, Dukovany

Takto označené zkoušky jsou prováděny mimo rozsah akreditace

Podklady dodané zákazníkem:

1. Název zkoušky

Zkoušky hlučnosti – měření akustického tlaku

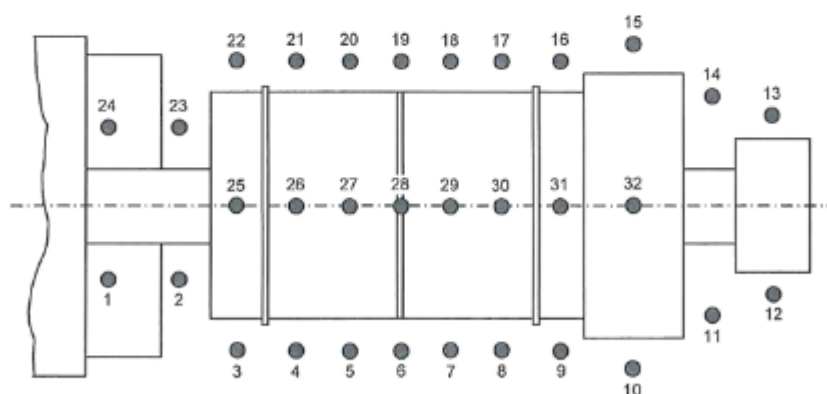
2. Zkušební postupy, metody

Technologický postup TSE/HLUK/14 – Monitorování hluku točivých strojů.

ČSN EN 61063 – Akustika – Měření hluku šířeného vzduchem, vyzařovaného pamími turbinami a jimi poháněnými stroji – místa měření.

3. Popis zkoušky

U generátoru 2H 6688/2 – VH, v. č. 051912 turbosoustrojí TG11 (1SP10) bylo provedeno měření hluku dle Technologického postupu ČEZ, TSE/HLUK/14, resp. ČSN EN 61063 v. měřících bodech 1 + 32 umístěných podle schématu na Obr. 1. Mikrofon byl v místech 1 + 24 umístěn ve výšce 1,5 m nad provozní podlahou generátoru a ve vzdálenosti $d = 0,3$ m od zařízení pod kompletním zvukoizolačním krytem. Podélná osa mikrofonu byla směřována vždy kolmo k povrchu referenční obalové plochy, v bodech 1 a 24 kolmo k zadní stěně NT dílu turbíny. Ve všech měřících bodech byla měřena vážená hladina akustického tlaku A při provozu turbosoustrojí TG11 na provozní výkonové hladině $P = 239$ MW, $Q = 48,7$ MVar a otáčkách $n = 3000$ min⁻¹ po dobu $t = 40$ s a současně byl signál nahráván pro pozdější dodatečné analýzy.



Obr. 1: Schéma měřících bodů – generátor TG11

..... pokračování na dalším listu

Přílohy: –

Protokol je vydáván pro zákazníka ve 2 vyhotoveních.

Uvedené výsledky zkoušek se týkají jen předmětu těchto zkoušek.

Protokol může být reprodukován pouze jeho celem.

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Zkušební laboratoř – Zkušebna hluk a vibrace, Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň, Česká republika
tel.: +420 371 430 750, mobil: +420 737 237 906, e-mail: chmelicek@vzuplzen.cz, www.vzuplzen.cz

PRO-45803-6/2018

List: 1/12



4. Použité přístroje a zařízení

Byly použity přístroje od firmy Brüel & Kjær (název, typ, výrobní číslo, číslo ověřovacího nebo kalibračního listu):

Mikrofon, 4189, 3099820, 8012-OL-10481-17 s kulovým krytem proti větru, UA 1650; ruční analyzátor, 2270, 3012019, 8012-OL-10479-17; akustický kalibrátor, 4230, 432197, 8012-KL-10324-17.

Dále byl použit anemometr Testo T410-2, 3855985/512, 934/16, 935/16 a 936/16 a svinovací metr – 10m, 33-443, VYZ-1655-0670-01A.

5. Výsledky zkoušek

Vážené hladiny akustického tlaku $A L_{pA}$, [dB] a hladiny akustického tlaku L_p , [dB] v měřicích bodech 1 + 32 ve vzdálenosti $d = 0,3$ m od generátoru spolu s hladinami akustického tlaku z předchozího měření při provozním stavu na výkonu jsou uvedeny v tabulce Tab. 1.

Datum měření	TG11 – provozní stav		Hladiny akustického tlaku v měřicích místech, [dB]							
			1	2	3	4	5	6	7	8
18.1.2017	Provoz na výkonu – $P=217$ MW, $Q=31,7$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹	L_{pA}	94,7	92,2	88,2	85,8	86,1	87,5	86,9	85,4
		L_p	102,7	102,4	99,6	102,9	99,7	101,2	101,6	95,9
27.5.2017	$P=242$ MW, $Q=2$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,99$, $U_0=15140$ V, $I_0=9280$ A, $U_b=235$ V, $I_b=1808$ A	L_{pA}	95,2	92,0	87,8	87,2	86,7	86,6	85,1	85,1
		L_p	100,0	100,2	98,6	100,7	98,3	97,6	97,9	97,7
14.7.2017	$P=246,4$ MW, $Q=-32$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,99$, $I_b=1770$ A	L_{pA}	93,7	92,4	85,3	84,1	82,8	83,4	83,1	82,7
		L_p	98,0	99,0	98,9	101,7	100,0	98,5	99,3	99,6
3.5.2018	$P=238,8$ MW, $Q=48,7$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,97$, $U_0=15930$ V, $I_0=8820$ A, $U_b=264$ V, $I_b=2010$ A	L_{pA}	97,9	93,7	88,2	87,1	86,5	84,9	85,6	85,7
		L_p	103,8	102,3	98,6	102,9	100,6	97,0	98,4	98,7
			9	10	11	12	13	14	15	16
18.1.2017	Provoz na výkonu – $P=217$ MW, $Q=31,7$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹	L_{pA}	87,0	85,9	91,8	92,5	90,9	90,7	84,8	88,2
		L_p	94,1	96,1	102,1	101,1	99,5	103,6	96,9	104,4
27.5.2017	$P=242$ MW, $Q=2$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,99$, $U_0=15140$ V, $I_0=9280$ A, $U_b=235$ V, $I_b=1808$ A	L_{pA}	86,5	84,9	92,6	93,0	91,3	91,5	84,5	86,0
		L_p	101,1	93,9	104,4	101,4	98,9	103,7	94,9	100,1
14.7.2017	$P=246,4$ MW, $Q=-32$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,99$, $I_b=1770$ A	L_{pA}	85,0	83,5	89,9	92,2	90,5	89,6	82,6	86,7
		L_p	102,4	93,7	99,4	99,7	98,8	101,3	95,8	104,5
3.5.2018	$P=238,8$ MW, $Q=48,7$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,97$, $U_0=15930$ V, $I_0=8820$ A, $U_b=264$ V, $I_b=2010$ A	L_{pA}	85,3	84,5	90,7	91,7	90,2	89,5	84,0	87,1
		L_p	98,5	94,7	100,2	99,6	97,3	101,4	96,3	104,6

Tab. 1: Naměřené hladiny akustického tlaku u generátoru turbosoustroj TG11, $d = 0,3$ m

..... pokračování na dalším listu



Datum měření	TG11 – provozní stav		Hladiny akustického tlaku v měřicích místech, [dB]							
			17	18	19	20	21	22	23	24
18.1.2017	Provoz na výkonu – $P=217$ MW, $Q=31,7$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹	L_{pA}	88,5	86,4	87,4	85,3	86,1	86,5	91,8	95,3
		L_p	104,7	101,7	101,1	100,8	99,8	96,0	102,1	104,0
27.5.2017	$P=242$ MW, $Q=2$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,99$, $U_G=15140$ V, $I_G=9280$ A, $U_b=235$ V, $I_b=1808$ A	L_{pA}	85,3	85,0	87,5	86,2	84,4	86,1	90,6	93,9
		L_p	98,6	98,0	100,1	98,7	96,7	96,0	100,5	102,8
14.7.2017	$P=246,4$ MW, $Q=32$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,99$, $I_b=1770$ A	L_{pA}	84,2	82,5	83,6	83,6	82,6	84,8	90,6	92,0
		L_p	100,6	96,4	95,3	96,0	97,3	97,7	98,9	99,2
3.5.2018	$P=238,8$ MW, $Q=48,7$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,97$, $U_G=15930$ V, $I_G=8820$ A, $U_b=264$ V, $I_b=2010$ A	L_{pA}	87,5	85,2	85,3	84,7	85,3	86,7	91,6	95,4
		L_p	104,0	101,0	99,4	99,1	100,7	99,2	101,6	105,3
			25	26	27	28	29	30	31	32
18.1.2017	Provoz na výkonu – $P=217$ MW, $Q=31,7$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹	L_{pA}	-	-	-	-	-	-	-	-
		L_p	-	-	-	-	-	-	-	-
27.5.2017	$P=242$ MW, $Q=2$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,99$, $U_G=15140$ V, $I_G=9280$ A, $U_b=235$ V, $I_b=1808$ A	L_{pA}	88,1	89,5	89,0	89,0	89,4	88,9	86,5	86,6
		L_p	97,1	97,9	99,2	100,0	98,9	98,2	102,2	102,6
14.7.2017	$P=246,4$ MW, $Q=32$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,99$, $I_b=1770$ A	L_{pA}	-	-	-	-	-	-	-	-
		L_p	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5.2018	$P=238,8$ MW, $Q=48,7$ MVar, $n=3000$ min ⁻¹ , $\cos\varphi=0,97$, $U_G=15930$ V, $I_G=8820$ A, $U_b=264$ V, $I_b=2010$ A	L_{pA}	86,9	86,6	87,4	86,9	87,5	86,2	86,5	87,4
		L_p	98,7	99,0	98,8	95,9	96,6	100,1	103,9	105,7

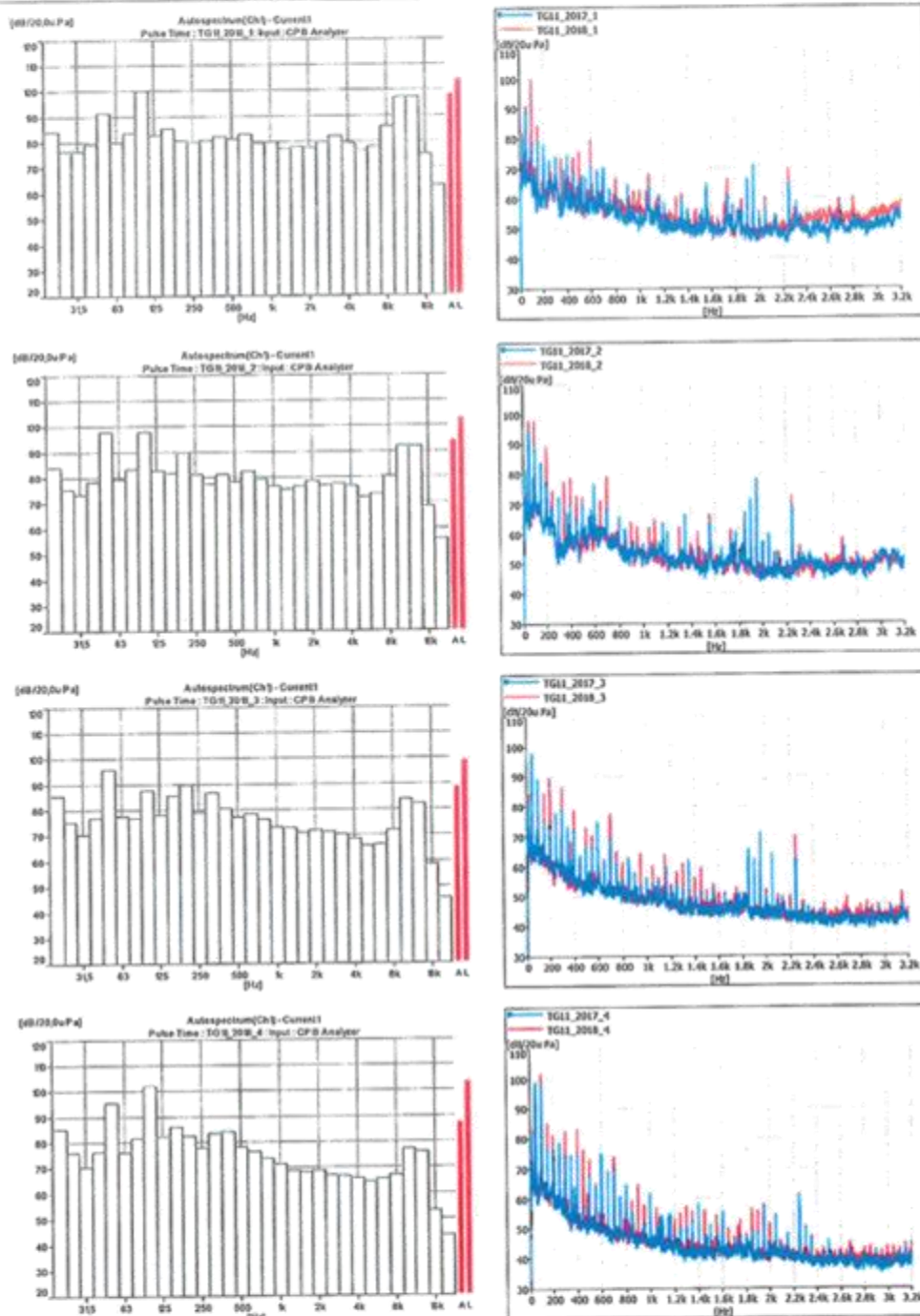
Tab. 1: Naměřené hladiny akustického tlaku u generátoru turbosoustroji TG11, $d = 0,3$ m – pokračování

Hladiny akustického tlaku A kolem generátoru TG11 ve vzdálenosti $d = 0,3$ m od zařízení jsou $L_{pA} = (84,0 + 97,9)$ dB a hladiny akustického tlaku $L_p = (94,7 + 105,7)$ dB pro výkonovou hladinu $P = 239$ MW. Při předchozím garančním měření TG11 provedeného dne 27. 5. 2017 v měřicích místech okolo generátoru byly hladiny $L_{pA} = (84,4 + 95,2)$ dB a $L_p = (93,9 + 104,4)$ dB. Měření provedena v lednu a červenci roku 2017 byla doplňková, při kterých nebyl měřen hluk v místech 25 + 32.

Střední hladiny akustického tlaku při předchozím diagnostickém měření (ze dne 27. 5. 2017) byly $\overline{L_{pA}} = 89,3$ dB a $\overline{L_p} = 99,9$ dB a při aktuálním diagnostickém měření (dne 3. 5. 2018) jsou $\overline{L_{pA}} = 89,5$ dB a $\overline{L_p} = 101,1$ dB. Oproti předchozímu měření je střední vážená hladina akustického tlaku A přibližně totožná, $\Delta L = 0,2$ dB a u střední hladiny akustického tlaku došlo k nepatrnému zvýšení o $\Delta L = 1,2$ dB.

Naměřená třetinooktávová a podrobnější úzkopásmová FFT spektra hladin akustického tlaku pro jednotlivá měřicí místa 1 + 32 jsou uvedena na obrázcích Obr. (2 + 9), kde úzkopásmová spektra jsou ve frekvenčním rozsahu $f = (0 + 3200)$ Hz s šířkou pásma $\Delta f = 1$ Hz. V obrázcích jsou modře znázorněna spektra akustického tlaku při předchozím diagnostickém měření (ze dne 27. 5. 2017), červeně pak z aktuálního diagnostického měření provedeného dne 3. 5. 2018.

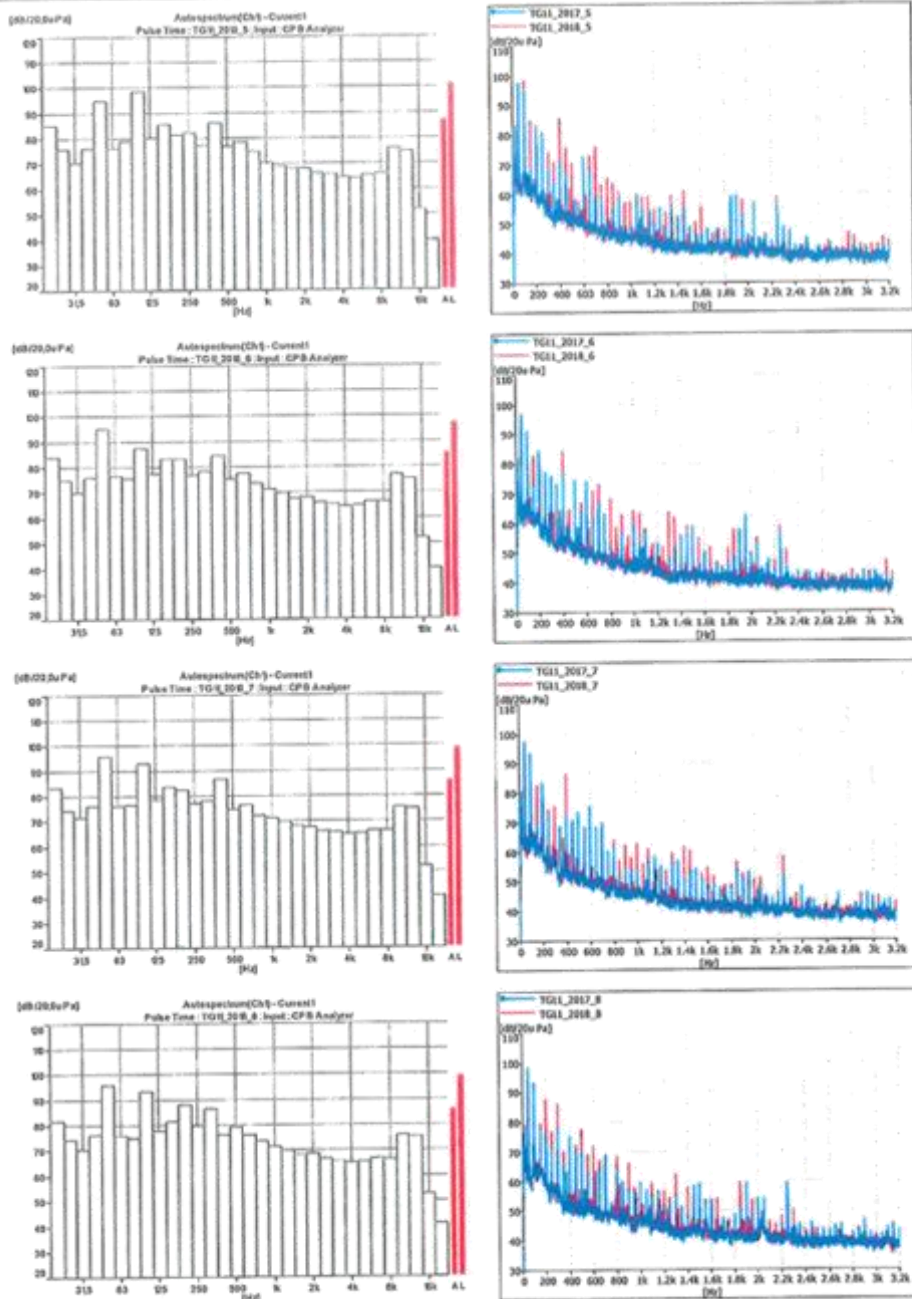
..... pokračování na dalším listu



Obr. 2: Spektra akustického tlaku při výkonu $P = 240$ MW - místo 1 + 4

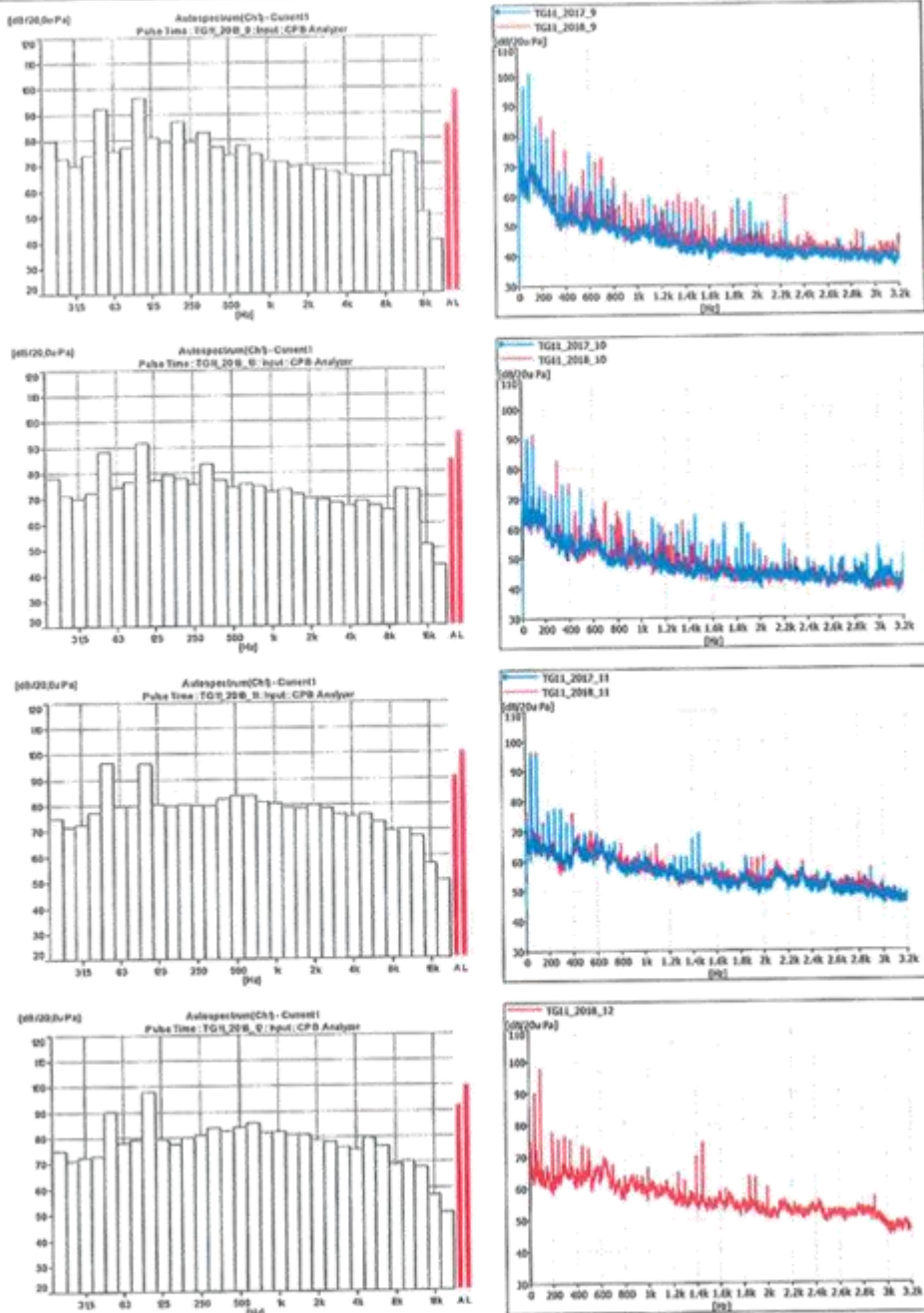
..... pokračování na dalším listu





Obr. 3: Spektra akustického tlaku při výkonu $P = 240$ MW - místo 5 + 8

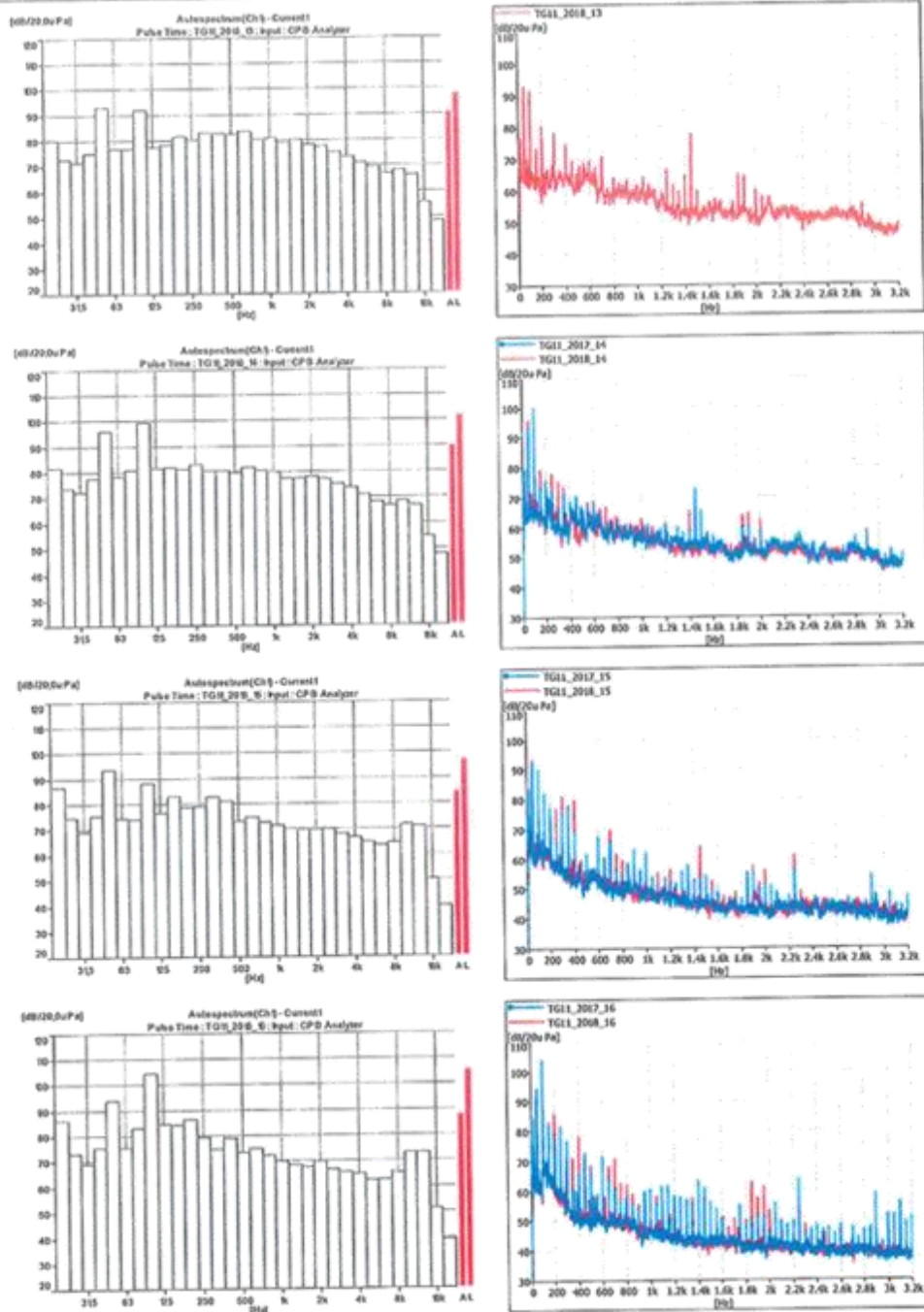
pokračování na dalším listu



Obr. 4: Spektra akustického tlaku při výkonu $P = 240$ MW - místo 9 + 12

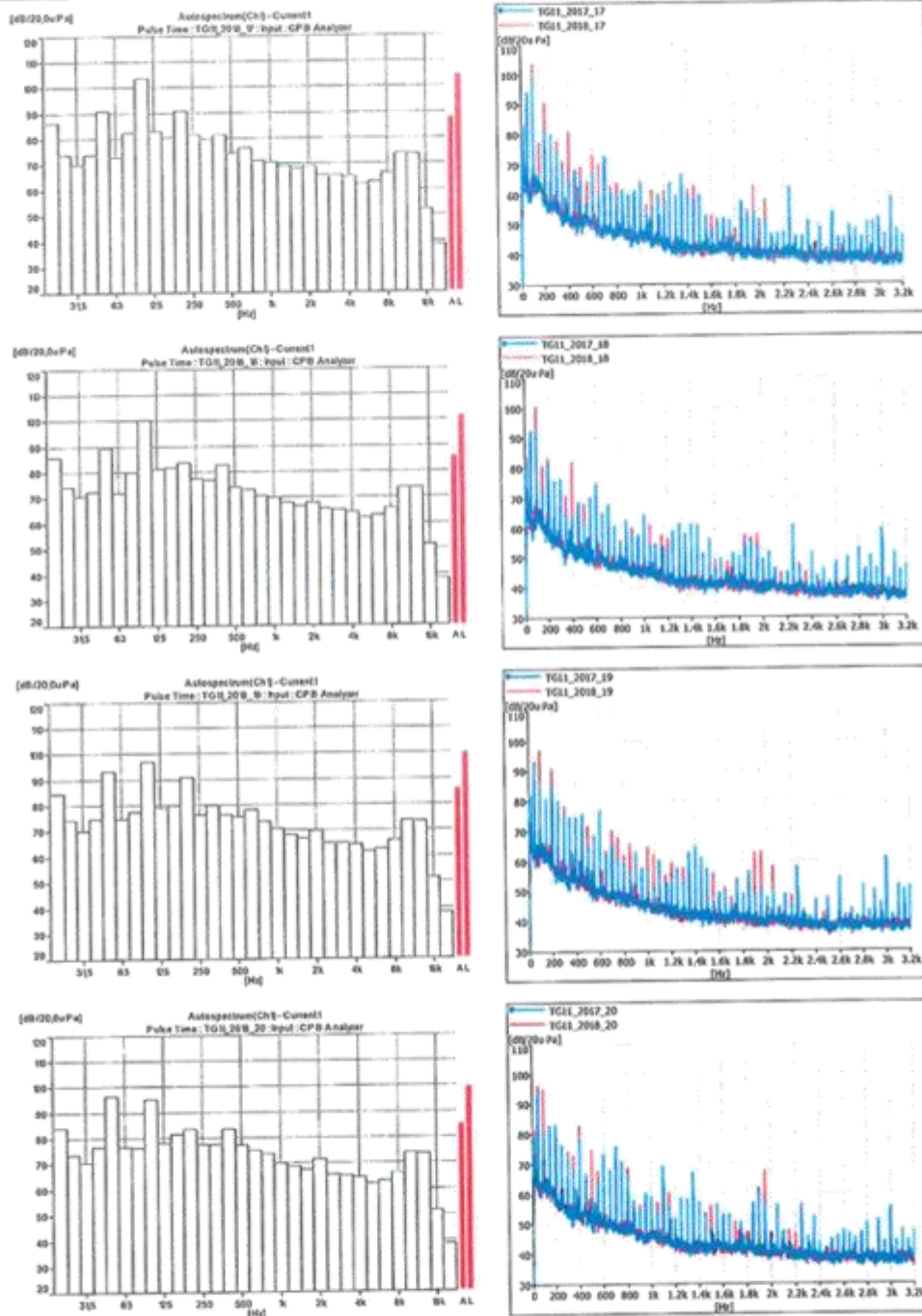
pokračování na dalším listu





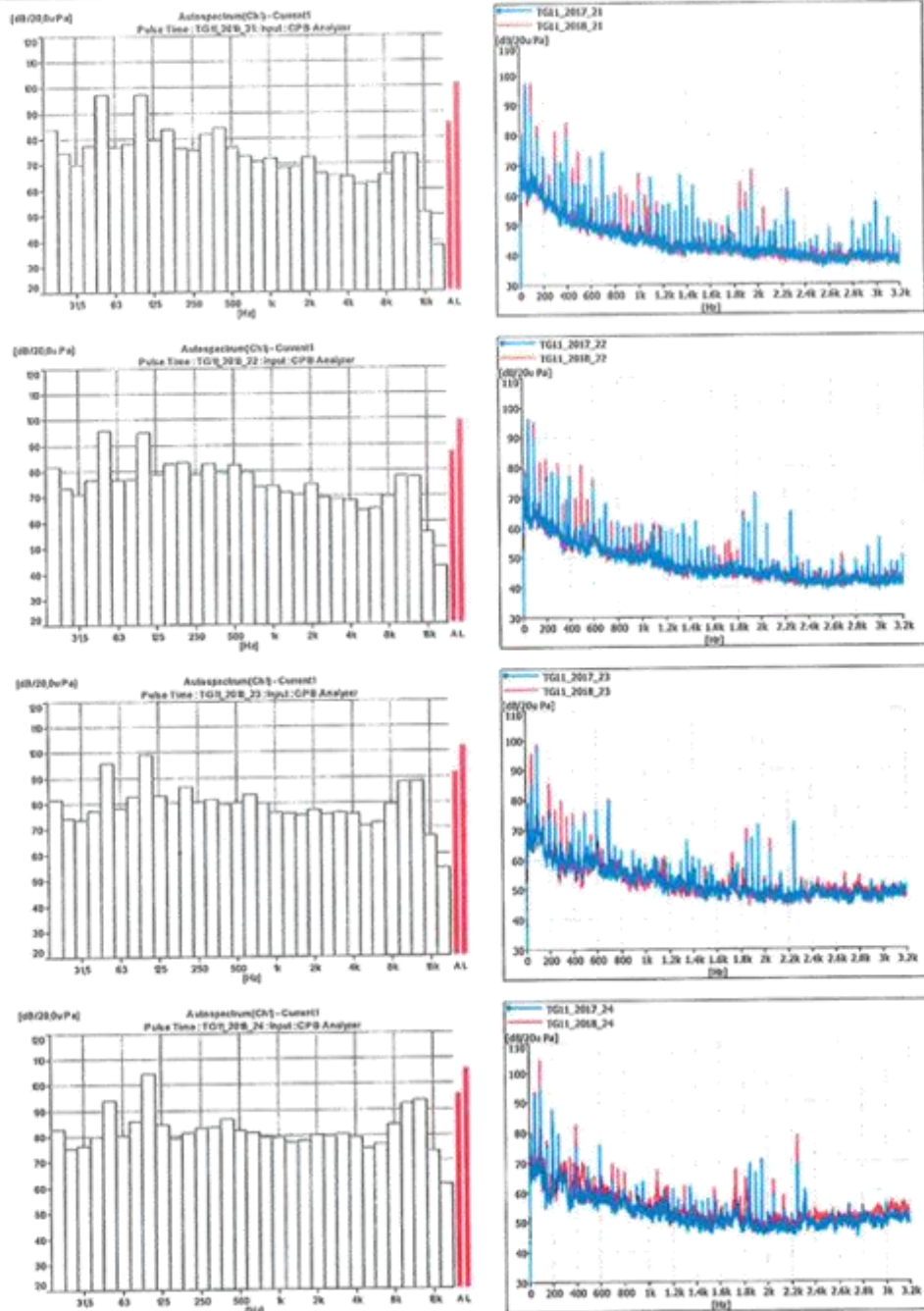
Obr. 5: Spektra akustického tlaku při výkonu $P = 240$ MW - místo 13 + 16

... pokračování na dalším listu



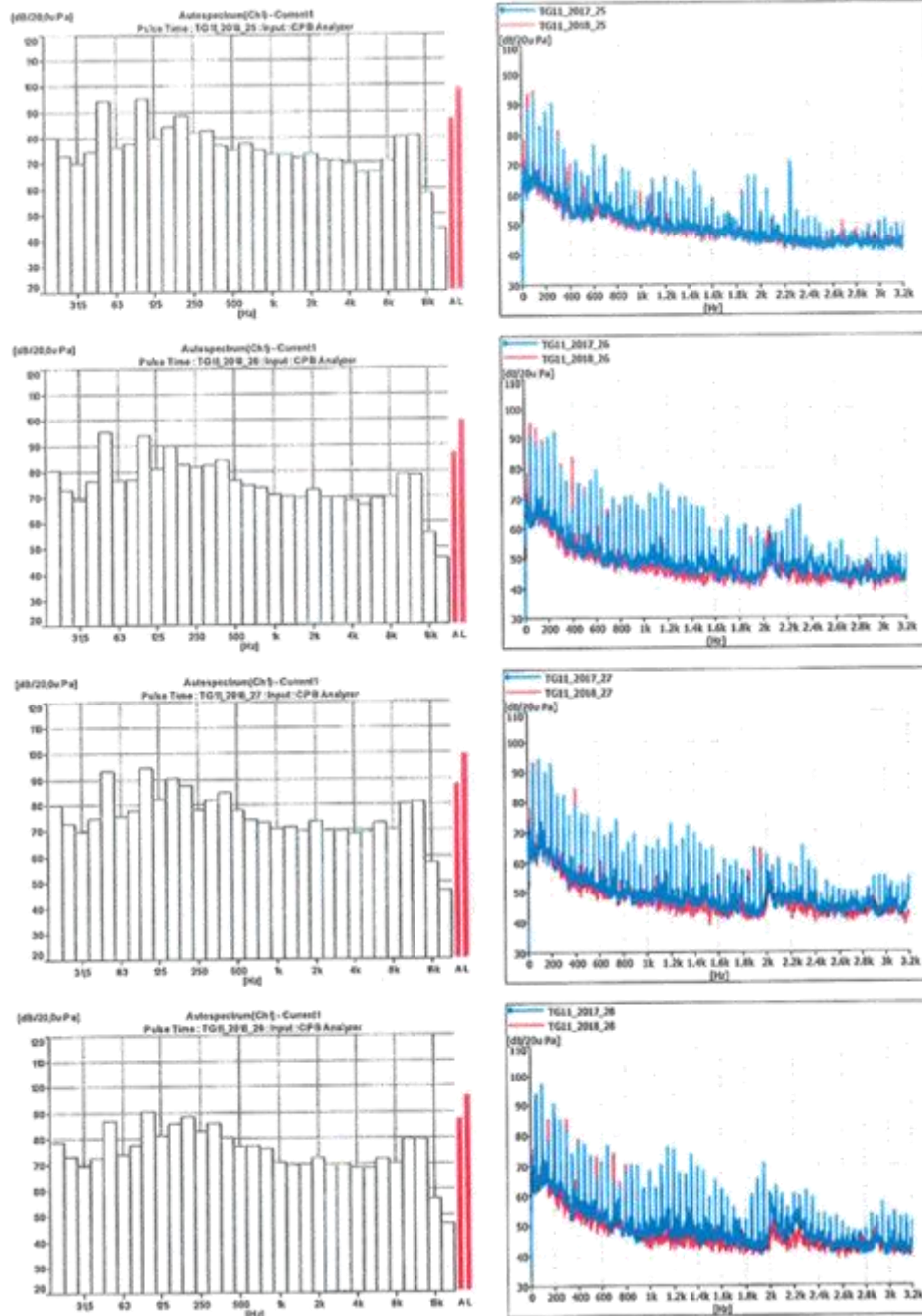
Obr. 6: Spektra akustického tlaku při výkonu $P = 240$ MW - místo 17 + 20

... pokračování na dalším listu



Obr. 7: Spektra akustického tlaku při výkonu $P = 240$ MW - místo 21 + 24

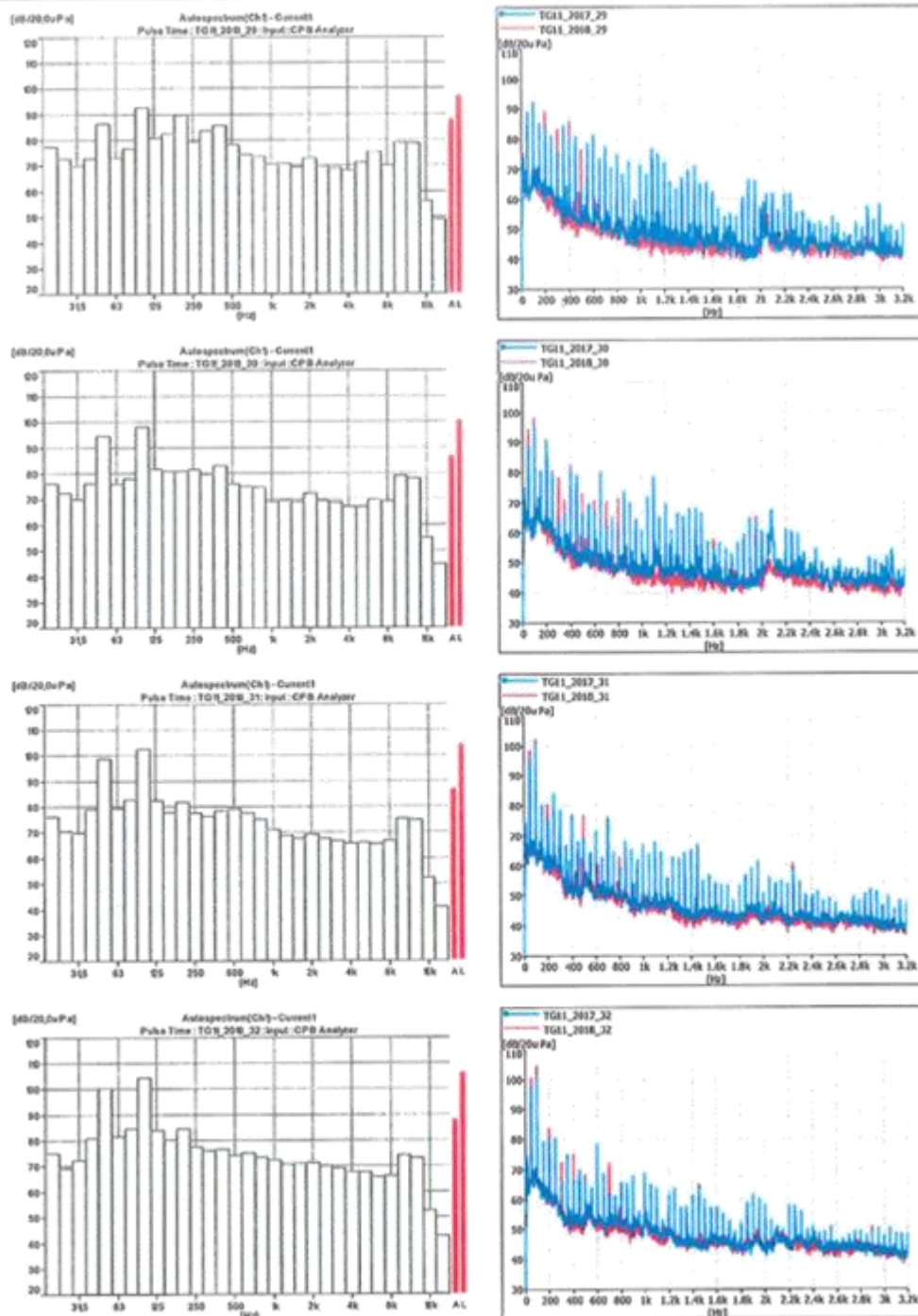
pokračování na dalším listu



Obr. 8: Spektra akustického tlaku při výkonu $P = 240$ MW - místo 25 + 28

... pokračování na dalším listu





Obr. 9: Spektra akustického tlaku při výkonu $P = 240$ MW - místo 29 + 32

pokračování na dalším listu

6. Nejistota měření

Nejistota měřicího řetězce je $\pm 1,5$ dB. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %.

7. Odborné stanovisko / Interpretace

Hladiny akustického tlaku A kolem generátoru TG11 (1SP10) ve vzdálenosti $d = 0,3$ m od zařízení jsou $L_{pA} = (84,0 + 97,9)$ dB a hladiny akustického tlaku $L_p = (84,7 + 105,7)$ dB pro výkonovou hladinu $P = 239$ MW. Při předchozím garančním měření TG11 provedeného dne 27. 5. 2017 v měřicích místech okolo generátoru byly hladiny $L_{pA} = (84,4 + 95,2)$ dB a $L_p = (83,9 + 104,4)$ dB.

Střední hladiny akustického tlaku při předchozím měření (ze dne 27. 5. 2017) byly $\bar{L}_{pA} = 89,3$ dB a $\bar{L}_p = 99,9$ dB, při aktuálním diagnostickém měření (dne 3. 5. 2018) jsou $\bar{L}_{pA} = 89,5$ dB a $\bar{L}_p = 101,1$ dB. Oproti předchozímu měření je střední vážená hladina akustického tlaku A přibližně totožná, $\Delta L = 0,2$ dB a u střední hladiny akustického tlaku došlo k nepatrnému zvýšení o $\Delta L = 1,2$ dB.

V úzkopásmových FFT spektrách hluku se vyskytuje velké množství výrazných harmonických složek základní frekvence $f = 50$ a 100 Hz. Charakter spektru je obdobný při obou diagnostických měřeních s významnými hladinami akustického tlaku i na vyšších frekvencích. V místech nad generátorem (místa 25 + 32) je patrný pokles úrovně jednotlivých harmonických složek.

Naproti jsou zaznamenány vyšší úrovně harmonických složek na pravé straně při pohledu od turbíny v místech 3 + 9. Vzhledem k nepatrnému rozdílu středních hladin akustického tlaku může toto zvýšení úrovně akustického tlaku souviset se změnou jiskrového proudu a buzení, která v průběhu měření proběhla.

Doporučujeme po najetí zařízení a ustálení provozních parametrů provést na provozním výkonu opakované doplňující diagnostické měření hluku za účelem srovnání hlučnosti u tohoto stroje při konstantním buzení.

Plzeň 30. 5. 2018

Ing. Miroslav Chmelíček
vedoucí Zkušebny Hluk a vibrace




koniec protokolu

